

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
20. November 2008 (20.11.2008)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2008/138738 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:

F03D 7/02 (2006.01) **F03D 7/04** (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2008/055186

(22) Internationales Anmeldedatum:

28. April 2008 (28.04.2008)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:

10 2007 022 705.3 15. Mai 2007 (15.05.2007) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT** [DE/DE]; Wittelsbacherplatz 2, 80333 München (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **EGEDAL, Per** [DK/DK]; Krogvejen 37, DK-7400 Herning (DK). **ENEVOLDSEN, Peder, Bay** [DK/DK]; Petershøjvej 10, DK-7100 Vejle (DK). **GREINER, Martin** [DE/DE]; Johann-Hackl-Ring 78, 85630 Neukeferloh (DE). **HJORT,**

Søren [DK/DK]; Frifeltvej 10, DK-7330 Brande (DK). **CLEVE, Jochen** [DE/DE]; Untere Weidenstr. 21, 81543 München (DE). **MEYER, Esther** [DE/DE]; Thorner Weg 16, 90425 Nürnberg (DE).

(74) Gemeinsamer Vertreter: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**; Postfach 22 16 34, 80506 München (DE).

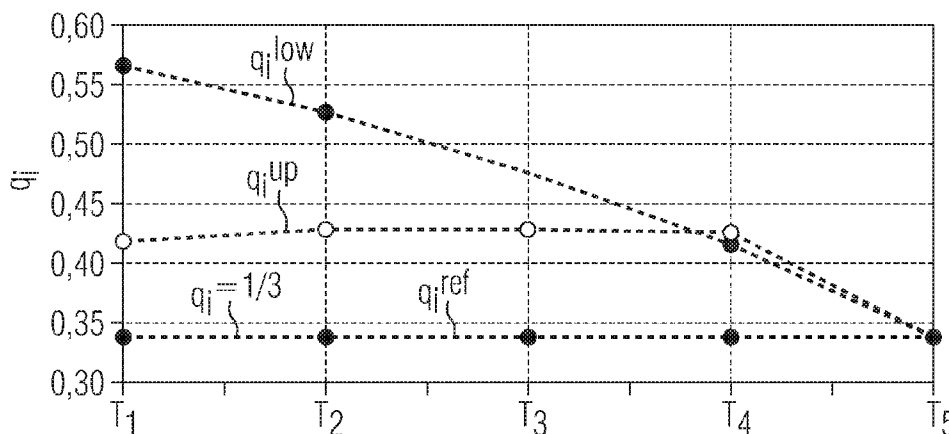
(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR OPERATING A WIND FARM COMPRISING A PLURALITY OF WIND TURBINES

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM BETRIEB EINES WINDPARKS MIT EINER MEHRZAHL VON WINDKRAFTANLAGEN

FIG 2



(57) Abstract: The invention relates to a method and a device for operating a wind farm comprising a plurality of wind turbines. According to said method, operating parameters of the wind turbines of the wind farm are adjusted according to an optimization goal, said optimization goal being the maximum value of the total output of the wind farm produced from the sum of all individual outputs of the wind turbines. The optimization goal differs from conventional optimization goals where the respective individual outputs of the wind turbines are optimized without taking the overall output into consideration. The inventors were able to demonstrate that the optimization goal according to the invention allows an improvement of the overall output.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2008/138738 A2



(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF,

BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

(57) **Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zum Betrieb eines Windparks mit einer Mehrzahl von Windkraftanlagen. In diesem Verfahren werden Betriebsparameter der Windkraftanlagen des Windparks gemäß einem Optimierungsziel eingestellt, wobei das Optimierungsziel der Maximalwert der aus der Summe aller Einzelleistungen der Windkraftanlagen gebildeten Gesamtleistung des Windparks ist. Dieses Optimierungsziel unterscheidet sich von herkömmlichen Optimierungszielen, bei denen jeweils die Einzelleistungen der Windkraftanlagen ohne Berücksichtigung der Gesamtleistung optimiert werden. Die Erfinder konnten nachweisen, dass mit diesem neuen Optimierungsziel eine verbesserte Gesamtleistung erreicht werden kann.

Beschreibung

Verfahren zum Betrieb eines Windparks mit einer Mehrzahl von Windkraftanlagen

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Betrieb eines Windparks mit einer Mehrzahl von Windkraftanlagen.

10 In Windparks wird mit Hilfe von Windkraftanlagen in der Form von Windturbinen kinetische Windenergie in elektrische Leistung umgewandelt. Bei herkömmlichen Windparks werden die Einzelleistungen der einzelnen Windkraftanlagen erfasst, und Betriebsparameter der Windkraftanlagen, insbesondere der Nei-

15 gungswinkel der Rotorblätter der einzelnen Turbinen, werden derart eingestellt, dass jede Einzelleistung für sich optimiert ist, d.h. bei vorgegebenen Windverhältnissen einen Maximalwert aufweist.

20 Aus der Druckschrift DE 10 2005 033 229 A1 ist ein Netzwerk zur Steuerung von Windkraftanlagen bekannt, wobei an den Windkraftanlagen für Messzwecke Sensoren vorgesehen sind und die Sensorwerte einer Windkraftanlage über ein entsprechendes Netz an andere Windkraftanlagen übertragen werden. Mit Hilfe

25 der Sensorwerte können Betriebsparameter, beispielsweise die Einstellung der Neigung der Rotorblätter, gesteuert werden kann.

Bekanntes Verfahren zum Betrieb eines Windparks steuern die

30 Betriebsparameter der einzelnen Windkraftanlagen unabhängig voneinander, ohne zu überprüfen, ob die Einstellung der Betriebsparameter jeder einzelnen Windkraftanlage auf einen maximalen Leistungswert auch tatsächlich die beste Gesamtleistung des Windparks erzeugt.

35

Aufgabe der Erfindung ist es deshalb, ein Verfahren zum Betrieb eines Windparks zu schaffen, mit dem die ausgegebene elektrische Gesamtleistung des Windparks verbessert wird.

Diese Aufgabe wird durch die unabhängigen Patentansprüche gelöst. Weiterbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen definiert.

5

In dem erfindungsgemäßen Verfahren werden während des Betriebs des Windparks Betriebsparameter der Windkraftanlagen des Windparks gemäß einem Optimierungsziel eingestellt, wobei das Optimierungsziel der Maximalwert der aus der Summe aller Einzelleistungen der Windkraftanlagen gebildeten Gesamtleistung des Windparks ist. Dieses Optimierungsziel ist für Windparks nicht bekannt. Bei Windparks gemäß dem Stand der Technik wird nämlich immer eine Einzeloptimierung der Einzelleistungen der Windkraftanlagen vorgenommen, ohne zu berücksichtigen, dass ggf. durch nicht optimale Einstellungswerte einzelner Windkraftanlagen dennoch eine verbesserte Gesamtleistung erreicht werden kann.

Der Erfindung liegt insbesondere die Erkenntnis zu Grunde, dass sich in Windparks die einzelnen Windkraftanlagen gegenseitig beeinflussen, insbesondere beeinflusst die Nachlaufströmung einer Windkraftanlage die Windverhältnisse der dahinter liegenden Windkraftanlage. Es wurde erfindungsgemäß erkannt, dass aufgrund dieser Wechselwirkungen die beste Gesamtleistung eines Windparks nicht durch die Einstellung der einzelnen Betriebsparameter der Windkraftanlagen auf einen Maximalwert der Einzelleistungen erreicht wird, sondern dass bessere Gesamtleistungswerte dann erreicht werden, wenn die Optimierung im Hinblick auf den Maximalwert der Summe aller Einzelleistungen erfolgt.

In einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens umfassen die Betriebsparameter, welche gemäß dem Optimierungsziel eingestellt werden, die jeweiligen Neigungswinkel der Rotorblätter der einzelnen Windkraftanlagen. Die Neigungswinkel der Rotorblätter legen die Nachlaufströmung der einzelnen Windkraftanlagen fest und sind deshalb die be-

vorzugten Parameter, über welche Veränderungen in der Gesamtleistung des Windparks erreicht werden können.

In einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens werden während des Betriebs des Windparks die jeweiligen Einzelleistungen der Windkraftanlagen erfasst und die Neigungswinkel der Rotorblätter in Rückkopplung mit den erfassten Einzelleistungen gemäß dem Optimierungsziel eingestellt. Bei diesem Verfahren wird ein besonders guter Realbetrieb des Windparks gewährleistet, da bei der Einstellung des Optimierungsziels auch immer die real vorliegenden Einzelleistungen berücksichtigt werden. Hierdurch können bessere Ergebnisse erreicht werden, als wenn das Optimierungsziel nur durch theoretische Berechnungen ohne Berücksichtigung des Realbetriebs festgelegt wird.

In einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist das Optimierungsziel gegeben durch eine Optimierung der Windgeschwindigkeits-Verhältnisse der Windkraftanlagen, wobei das Windgeschwindigkeits-Verhältnis einer jeweiligen Windkraftanlage gegeben ist durch das Verhältnis der zentralen Windgeschwindigkeit (d.h. der Windgeschwindigkeit im Zentrum des Rotors der jeweiligen Windkraftanlage) unmittelbar nach der jeweiligen Windkraftanlage zu der zentralen Windgeschwindigkeit unmittelbar vor der jeweiligen Windkraftanlage. Vorzugsweise wird das Windgeschwindigkeits-Verhältnis einer jeweiligen Windkraftanlage über den Neigungswinkel der Rotorblätter der jeweiligen Windkraftanlage eingestellt, wobei die Abhängigkeit des Neigungswinkels von dem Windgeschwindigkeits-Verhältnis für jede Windkraftanlage vorbekannt ist bzw. auf einfache Weise bestimmt werden kann.

In einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird ein linearer Windpark betrieben, der eine oder mehrere parallele Reihen von hintereinander angeordneten, insbesondere baugleichen Windkraftanlagen aufweist. Bei einem solchen Windpark ist das Optimierungsziel bei vorgegebener Windgeschwindigkeit parallel zu den Reihen der hinter-

einander angeordneten Windkraftanlagen gegeben durch die Maximalleistungen der Reihen von hintereinander angeordneten Windkraftanlagen. Hierbei wird die Tatsache berücksichtigt, dass bei einem parallel zu den Reihen einfallenden Wind keine
 5 Beeinflussung der Windkraftanlagen von verschiedenen Reihen erfolgt, so dass für jede Reihe einzeln eine Optimierung im Hinblick auf die Maximalleistung aller Windkraftanlagen in der Reihe vorgenommen werden kann.

10 In einer weiteren Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird die Maximalleistung einer jeweiligen Reihe von hintereinander angeordneten Windkraftanlagen durch Optimierung der Windgeschwindigkeits-Verhältnisse der jeweiligen Windkraftanlagen einer Reihe gemäß folgender Gleichung bestimmt:

15

$$\{q_i\}_{opt} = \arg \max \left(\sum_{i=1}^N P_i(q_i|v_i) \right)$$

wobei N die Anzahl von Windkraftanlagen in einer Reihe ist und die Windkraftanlagen in einer Reihe in Windrichtung in
 20 aufsteigender Reihenfolge nummeriert sind;

wobei q_i das Verhältnis der zentralen Windgeschwindigkeit unmittelbar nach der i-ten Windkraftanlage zur zentralen Windgeschwindigkeit v_i unmittelbar vor der i-ten Windkraftanlage
 25 ist;

wobei $P_i(q_i|v_i)$ die Einzelleistung der i-ten Windkraftanlage in Abhängigkeit von dem Windgeschwindigkeitsverhältnis q_i bei gegebener zentraler Windgeschwindigkeit v_i unmittelbar vor
 30 der i-ten Windkraftanlage ist.

Vorzugsweise ist hierbei die Leistung $P_i(q_i|v_i)$ durch folgende Gleichung gegeben:

$$35 \quad P_i(q_i|v_i) = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v_i^3 \frac{(1+q_i)(1-q_i^2)}{2}$$

wobei ρ die Luftdichte ist und R der Radius des Rotors der i -ten Windkraftanlage ist und wobei v_i die zentrale Windgeschwindigkeit unmittelbar vor der i -ten Windkraftanlage ist.

5

Der obige Zusammenhang ist dem Fachmann auf dem Gebiet der Winderzeugung hinlänglich bekannt und kann in dem erfindungsgemäßen Verfahren zur rechnergestützten Bestimmung der Einzelleistung P_i einer Turbine verwendet werden.

10

In einer besonders bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird die zentrale Windgeschwindigkeit v_i unmittelbar vor der i -ten Windkraftanlage mit Hilfe der folgenden Formel bestimmt:

15

$$\pi \left((R + x \tan \alpha)^2 - R^2 \right) v_{i-1}^* + \pi R^2 q_{i-1} v_{i-1} = \pi (R + x \tan \alpha)^2 v_i, \quad (i \geq 2)$$

wobei R der Radius des Rotors der $(i-1)$ -ten Windkraftanlage ist;

20

wobei x der Abstand der $(i-1)$ -ten Windkraftanlage zur i -ten Windkraftanlage ist;

wobei v_{i-1}^* die periphere Windgeschwindigkeit am Rand des Rotors der $(i-1)$ -ten Windkraftanlage ist;

25

wobei α der Neigungswinkel der Nachlaufströmung der $(i-1)$ -ten Windkraftanlage ist.

Der Neigungswinkel α ist eine für eine jeweilige Windkraftanlage fest vergebene Größe.

Die oben definierte periphere Windgeschwindigkeit v_{i-1}^* wird hierbei durch einen Wert abgeschätzt, der zwischen der zentralen Windgeschwindigkeit v_{i-1} unmittelbar vor dem Zentrum des Rotors der $(i-1)$ -ten Windkraftanlage und der zentralen Wind-

35

geschwindigkeit v_1 unmittelbar vor dem Zentrum des Rotors der ersten Windkraftanlage liegt.

In einer weiteren, bevorzugten Ausführungsform der Erfindung werden die Betriebsparameter gemäß dem Optimierungsziel mit Hilfe eines numerischen Verfahrens, insbesondere eines Gradienten-Verfahrens, bestimmt.

In einer Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens werden für eine vorgegebene Anzahl an Referenz-Windbedingungen die Betriebsparameter gemäß dem Optimierungsziel vorab vorgegeben. Bei der Einstellung der Betriebsparameter wird hierbei vorzugsweise künstliche Intelligenz verwendet, insbesondere in der Form eines künstlichen neuronalen Netzes und/oder eines probabilistischen Netzes (z.B. eines Bayesianisches Netzes). Das künstliche neuronale Netz bzw. das probabilistische Netz sind hierbei mit den Betriebsparametern für die vorgegebene Anzahl an Referenz-Windbedingungen gelernt. Auf diese Weise können mit dem Verfahren für beliebige Windbedingungen, welche von den Referenz-Bedingungen abweichen, immer optimale Betriebsparameter für eine maximale Gesamtleistung des Windparks errechnet werden.

Neben dem oben beschriebenen Verfahren umfasst die Erfindung ferner eine Vorrichtung zum Betrieb eines Windparks mit einer Mehrzahl von Windkraftanlagen, wobei die Vorrichtung eine Steuereinheit beinhaltet, mit der Betriebsparameter der Windkraftanlage in Abhängigkeit von einem Optimierungsziel einstellbar sind, wobei das Optimierungsziel der Maximalwert der aus der Summe aller Einzelleistungen der Windkraftanlagen gebildeten Gesamtleistung des Windparks ist. Diese Vorrichtung ist vorzugsweise derart ausgestaltet, dass ein Betrieb des Windparks gemäß jeder Variante des oben beschriebenen erfindungsgemäßen Verfahrens möglich ist.

35

In einer bevorzugten Ausgestaltung umfasst die erfindungsgemäße Vorrichtung ein Netz, insbesondere ein drahtgebundenes Netz und/oder drahtloses Netz, über das die Steuereinheit mit

den Windkraftanlagen verbunden ist, wobei über das Netz Steuerbefehle zur Einstellung der Betriebsparameter der Windkraftanlagen an die Windkraftanlagen übertragen werden. Vorzugsweise können über das Netz ferner Werte der Einzelleistungen der Windkraftanlagen an die Steuereinheit gemeldet werden.

Die Erfindung betrifft darüber hinaus einen Windpark mit einer Mehrzahl von Windkraftanlagen, welche die soeben beschriebene Vorrichtung zum Betrieb des Windparks umfasst.

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der beigefügten Figuren detailliert beschrieben.

Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines linearen Windparks mit hintereinander angeordneten Windkraftanlagen, welcher mit einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens betrieben wird;

Fig. 2 ein Diagramm, welches für einen linearen Windpark aus fünf hintereinander angeordneten Windkraftanlagen die Einstellungen von Windgeschwindigkeits-Verhältnissen der einzelnen Windkraftanlagen auf der Basis eines Verfahrens gemäß dem Stand der Technik sowie auf der Basis von zwei erfindungsgemäßen Ausgestaltungen von Betriebsverfahren wiedergibt; und

Fig. 3 und 4 Diagramme, welche für zwei Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens jeweils die Wirkungsgrade des erfindungsgemäßen Verfahrens mit einem Verfahren gemäß dem Stand der Technik vergleichen.

In Fig. 1 ist schematisiert in Draufsicht ein Windpark mit einer Vielzahl von Windkraftanlagen $T_1, \dots, T_{i-1}, T_i, \dots$ in der Form von einzelnen baugleichen Generatorturbinen gezeigt, welche mit konstantem Abstand x voneinander beabstandet sind und durch einen entsprechenden Frontalwind mit der Geschwindigkeit v_1 angetrieben werden. Die Richtung des Windes ist hierbei senkrecht zu der Ausdehnung der durch mehrere Rotorblätter gebildeten Rotoren RO der Windkraftanlagen, wobei der Radius der einzelnen Rotorblätter mit R bezeichnet ist. Darüber hinaus ist in Fig. 1 der Neigungswinkel α der Nachlaufströmung hinter der Turbine T_{i-1} dargestellt. Der Bereich der Nachlaufströmung, der außerhalb des Querschnitts des Rotors RO liegt, ergibt sich hierbei aus dem Abstand x zwischen den benachbarten Turbinen T_{i-1} und T_i und deckt den radialen Abschnitt $x \tan \alpha$ ab.

In der Darstellung der Fig. 1 ist die Strömung unmittelbar vor der $(i-1)$ -ten Turbine bzw. der i -ten Turbine mit v_{i-1} bzw. v_i bezeichnet. Ferner wird die Strömung unmittelbar hinter der $(i-1)$ -ten Turbine mit $q_{i-1} v_{i-1}$ bezeichnet. Somit gibt der Parameter q_i ($i = 1, \dots, N$) das Verhältnis der Windgeschwindigkeit direkt hinter und direkt vor der i -ten Turbine wieder. Dieses Verhältnis q_i kann über den entsprechenden Neigungswinkel der Rotorblätter einer Turbine gesteuert werden.

Wie bereits im Vorangegangenen dargelegt, werden Betriebsparameter der einzelnen Turbinen in Abhängigkeit von einem Optimierungsziel derart eingestellt, dass die elektrische Gesamtausgangsleistung, welche die Summe der Einzelleistungen aller Turbinen darstellt, maximal ist. In der hier beschriebenen Ausführungsform der Erfindung wird dabei als Betriebsparameter der Neigungswinkel der Rotorblätter verwendet, der über entsprechende Motoren an den Rotorblättern in geeigneter Weise verändert werden kann.

Nachfolgend wird das Optimierungsziel durch optimierte Windgeschwindigkeits-Verhältnisse q_i repräsentiert, wobei q_i wiederum von dem Neigungswinkel der Rotorblätter abhängt. Die

optimalen Werte für q_i werden durch ein mathematisches Opti-
 mierungsverfahren berechnet. Es können somit vorab durch nu-
 merische Simulationen optimierte Windgeschwindigkeits-Ver-
 hältnisse q_i und hieraus optimierte Neigungswinkel der Rotor-
 5 blätter für unterschiedliche Frontalgeschwindigkeiten v_1 be-
 rechnet werden, so dass die optimierten Neigungswinkel dann
 im Realbetrieb des Windparks in Abhängigkeit von der gegebene-
 nen Windgeschwindigkeit v_1 optimal eingestellt werden. Hierzu
 ist eine entsprechende Steuereinheit S vorgesehen, welche
 10 vorzugsweise mit künstlicher Intelligenz versehen ist, um
 auch für neue Windgeschwindigkeiten, für welche vorab keine
 optimierten Neigungswinkel berechnet wurden, optimierte Nei-
 gungswinkel zu bestimmen. Diese künstliche Intelligenz kann
 insbesondere durch neuronale Netze bzw. durch probabilisti-
 15 sche Netze, wie z.B. Bayesianische Netze, gebildet sein, wo-
 bei diese Netze mit optimalen Neigungswinkeln und dazugehörigen
 Einzelleistungen der Turbinen gelernt sind.

In der hier beschriebenen Ausführungsform des erfindungsgemä-
 20 ßen Verfahrens wird folgender, auf der Bernoulli-Gleichung
 basierender Zusammenhang zwischen physikalischen Größen der
 Turbine einer Windkraftanlage verwendet:

$$\pi \left((R + x \tan \alpha)^2 - R^2 \right) v_{i-1}^* + \pi R^2 q_{i-1} v_{i-1} = \pi (R + x \tan \alpha)^2 v_i, \quad (i \geq 2)$$

25 (1).

Wie bereits dargelegt, ist R der Radius des entsprechenden
 Rotorblattes einer Turbine, x der Abstand zwischen zwei be-
 nachbarten Turbinen und α der Neigungswinkel der Nachlauf-
 30 strömung. Ferner repräsentieren v_i und v_{i-1} die zentralen
 Windgeschwindigkeiten (d.h. die Geschwindigkeiten im Zentrum
 des jeweiligen Rotors) direkt vor den Turbinen T_i bzw. T_{i-1} .
 $q_{i-1} v_{i-1}$ repräsentiert die zentrale Windgeschwindigkeit direkt
 hinter der Turbine T_{i-1} . v_{i-1}^* beschreibt die Windgeschwindig-
 35 keit am äußeren Rand des Rotors der Turbine T_{i-1} , wobei fol-
 gende zwei Abschätzungen für v_{i-1}^* verwendet werden:

$$v_{i-1}^* = \begin{cases} v_1 & (\text{obere Abschätzung}) \\ v_{i-1} & (\text{untere Abschätzung}) \end{cases} \quad (2).$$

Bei der unteren Abschätzung wird angenommen, dass die Geschwindigkeit v_{i-1}^* am Rand des Rotors genauso groß ist wie die Geschwindigkeit v_{i-1} im Zentrum des Rotors unmittelbar vor der Turbine T_{i-1} . Diese Abschätzung ist für kleine Abstände x zwischen den einzelnen Turbinen gültig. Bei der oberen Abschätzung wird angenommen, dass die Windgeschwindigkeit v_{i-1}^* am Rand des Rotors sich bereits wieder auf die frontale Windgeschwindigkeit v_1 beschleunigt hat. Die untere Abschätzung gilt für Windparks mit großen Abständen x der einzelnen Turbinen zueinander. Der Wert von v_{i-1}^* wird deshalb in Abhängigkeit von der Konfiguration des Windparks zwischen v_{i-1} und v_1 derart gewählt, dass die realen Gegebenheiten am Besten wiedergegeben werden. Mit Hilfe der oberen bzw. unteren Abschätzung von v_{i-1}^* können dann folgende Geschwindigkeiten v_i unmittelbar vor dem Zentrum des Rotors der i -ten Windkraftanlage durch Verwendung der Gleichung (1) wie folgt bestimmt werden:

$$v_i = \begin{cases} v_1 \left(1 - \left(1 - q_{i-1} \frac{v_{i-1}}{v_1} \right) \left(\frac{R}{R+x \tan \alpha} \right)^2 \right) & (\text{obere Abschätzung}) \\ v_{i-1} \left(1 - (1 - q_{i-1}) \left(\frac{R}{R+x \tan \alpha} \right)^2 \right) & (\text{untere Abschätzung}) \end{cases} \quad (3).$$

Mit Hilfe einer dem Fachmann hinlänglich bekannten Formel zur Beschreibung der Einzelleistung P_i der Turbine T_i kann diese Einzelleistung P_i in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit v_i und dem Windgeschwindigkeits-Verhältnis q_i wie folgt geschrieben werden:

$$P_i = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v_i^3 \frac{(1+q_i)(1-q_i^2)}{2} \quad (4).$$

In Gleichung (4) repräsentiert ρ die Luftdichte und der Koeffizient $C(q) = (1+q)(1-q^2)/2$ nimmt den Maximalwert bei

$q = 1/3$ an. Dies stellt das bekannte klassische Ergebnis zur Optimierung der jeweiligen Einzelleistungen der Turbinen in einem Windpark dar. Die Windgeschwindigkeit v vor der Turbine wird bei diesem Ergebnis auf $v/3$ hinter der Turbine abge-
 5 bremsst. Indem $q_i = 1/3$, $i = 1, \dots, N$ für alle Turbinen gewählt wird, ergibt sich hieraus die von dem Windpark erzeugte Gesamtleistung wie folgt:

$$P_{tot}(q_i = 1/3, i = 1:N | v_i) = \sum_{i=1}^N P_i(q_i = 1/3 | v_i) \quad (5).$$

10

Die Gesamtleistung gemäß Gleichung (5) stellt eine Optimierung der Einzelleistungen der Turbinen dar, ohne dass die Wechselwirkung der durch die Turbinen erzeugten Strömungen untereinander berücksichtigt wird. Die Gesamtleistung ist so-
 15 mit eine „eigennützige“ Optimierung für jede Einzelturbine und ein auf der Basis dieser Optimierung ermitteltes Ergebnis wird im Folgenden als Referenzoptimierung bezeichnet. Erfindungsgemäß wurde erkannt, dass diese Referenzoptimierung nicht die beste Gesamtleistung der Summe aller Einzelleistun-
 20 gen der Turbinen liefert und es wurde stattdessen eine Optimierung verwendet, bei der als Optimierungsziel die Gesamtleistung aller Einzelturbinen optimiert wird. Es wird hierbei der Tatsache Rechnung getragen, dass sich die Strömungen der einzelnen Turbinen gegenseitig beeinflussen, so dass das Ma-
 25 ximum der Gesamtleistung nicht einfach dadurch bestimmt werden kann, dass die Maxima aller Einzelleistungen der Turbinen ermittelt werden.

Erfindungsgemäß wird nach dem optimalen Satz von Windgeschwindigkeits-Verhältnissen q_i ($i = 1, \dots, N$) der N Turbinen gesucht, wobei dieser optimale Satz mathematisch wie folgt dargestellt werden kann:

$$\{q_i\}_{opt} = \arg \max \left(\sum_{i=1}^N P_i(q_i | v_i) \right) \quad (6).$$

35

Hierbei bezeichnet $P_i(q_i|v_i)$ die Einzelleistung der i -ten Turbine für ein Windgeschwindigkeits-Verhältnis q_i unter der Bedingung des zentralen Geschwindigkeitswerts v_i unmittelbar vor der Turbine T_i .

5

In einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wurde ein Quasi-Newton-Optimierungsverfahren für den Windpark der Fig. 1 zur Bestimmung von optimalen Werten für q_i verwendet, wobei ein Windpark mit $N = 5$ hintereinander angeordneten
 10 Turbinen mit äquidistantem Abstand $x/R = 20$ und $\tan\alpha = 0,1$ betrachtet wurde. Da die Nachlaufströmung der letzten Turbine T_N keine weitere Turbine mehr beeinflusst, ergibt sich für das Geschwindigkeitsverhältnis q_N der optimale Wert für die Einzelleistung dieser Turbine, nämlich $q_N = 1/3$. Für alle anderen Turbinen $i = 1: N-1$ sind die entsprechenden Windgeschwindigkeits-Verhältnisse $q_i > 1/3$, d.h. diese Verhältnisse sind immer größer als in der Referenzoptimierung. Fig. 2 zeigt ein Diagramm, welches die einzelnen optimierten Werte q_i der Turbinen T_1 bis T_5 für die Referenzoptimierung sowie
 15 für die Optimierung gemäß der Gleichung (6) zeigt, wobei zum einen die obere Abschätzung $v_{i-1}^* = v_1$ (in Fig. 2 als q_i^{up} bezeichnet) und zum anderen die untere Abschätzung für $v_{i-1}^* = v_{i-1}$ (in Fig. 2 als q_i^{low} bezeichnet) verwendet wurden. Die Referenzoptimierung ist als q_i^{ref} bezeichnet. Wie bereits
 20 dargelegt, gilt bei der Referenzoptimierung für alle Werte q_i der einzelnen Turbinen $q_i = 1/3$. Demgegenüber sind für die Optimierungen gemäß Gleichung (6) die Werte für q_i immer größer als $1/3$, lediglich der letzte Wert für die Turbine T_5 entspricht wieder dem Wert $1/3$.

30

Fig. 3 und Fig. 4 zeigen die berechneten Wirkungsgrade von linearen Windparks mit unterschiedlicher Anzahl an Turbinen, wobei der Wirkungsgrad η gegeben ist durch folgende Formel:

$$35 \quad \eta = P_{\text{tot}}(q_i, i = 1: N | v_i) / \left(NP(q = 1/3 | v_1) \right) \quad (7).$$

Aus Formel (7) ergibt sich, dass der Wirkungsgrad η repräsentiert wird durch die Gesamtleistung der Turbinen im Windpark geteilt durch die Summe der Einzelleistungen der Turbinen im Windpark unter der Bedingung, dass alle Turbinen mit vollem Frontalwind v_1 betrieben werden und jede Turbine auf das Windgeschwindigkeits-Verhältnis $q = 1/3$ eingestellt ist.

In den Fig. 3 und 4 werden jeweils die mit der Referenzoptimierung ermittelten Wirkungsgrade mit den gemäß der Erfindung ermittelten Wirkungsgraden sowohl für die obere Abschätzung $v_{i-1}^* = v_1$ als auch für die untere Abschätzung $v_{i-1}^* = v_{i-1}$ verglichen. In Fig. 3 sind hierbei die Ergebnisse für die obere Abschätzung und in Fig. 4 für die untere Abschätzung wiedergegeben. Man erkennt in Fig. 3 und 4 drei aus Balken bestehende Triplets BT1, BT2 und BT3, wobei jedes Triplet für ein entsprechendes Verhältnis x/R steht. Insbesondere gilt für das Triplet BT1 $x/R = 10$, für das Triplet BT2 $x/R = 15$ und für das Triplet BT3 $x/R = 20$. Die linken Balken B_1 bzw. B_1' in einem jeweiligen Triplet zeigen den Wirkungsgrad für die Referenzoptimierung bzw. für die Optimierung gemäß Gleichung (6) für einen Windpark mit $N = 5$ Turbinen. Die mittleren Balken B_2 bzw. B_2' in einem jeweiligen Triplet zeigen den Wirkungsgrad für die Referenzoptimierung bzw. für die Optimierung gemäß Gleichung (6) für einen Windpark mit $N = 6$ Turbinen. Die rechten Balken B_3 bzw. B_3' in einem jeweiligen Triplet zeigen den Wirkungsgrad für die Referenzoptimierung bzw. für die Optimierung nach Gleichung (6) für einen Windpark mit $N = 7$ Turbinen. Wie man aus Fig. 3 und Fig. 4 erkennt, sind die Wirkungsgrade, welche erfindungsgemäß nach Gleichung (6) ermittelt wurden, d.h. die Wirkungsgrade gemäß den Balken B_1' , B_2' und B_3' immer besser als die entsprechenden Wirkungsgrade gemäß der klassischen Referenzoptimierung, welche durch die Balken B_1 , B_2 und B_3 wiedergegeben werden. Besonders groß ist diese Verbesserung in Fig. 4 bei Verwendung der unteren Abschätzung $v_{i-1}^* = v_{i-1}$. Gemäß den simulierten Ergebnissen nach Fig. 3 und Fig. 4 ist somit davon auszugehen, dass sich im Realbetrieb eines Windparks deutliche Effizienzsteigerungen ergeben, wenn die Betriebsparameter der einzelnen Turbinen im

Hinblick auf eine Maximierung der Gesamtleistung aller Turbinen eingestellt werden.

Wie sich aus Fig. 3 und 4 ergibt, kann mit dem erfindungsgemäßen Verfahren eine Verbesserung der Gesamtleistung um einige Prozent erreicht werden. Bei einem Windpark mit 50 Windturbinen mit einer Leistung von jeweils 2,3 Megawatt, welcher derzeit ungefähr 500 Gigawattstunden pro Jahr erzeugt, wird bereits bei einer Erhöhung der Ausgangsleistung um 1% ein zusätzlicher Gewinn von 500000 EUR erreicht.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betrieb eines Windparks mit einer Mehrzahl von Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i), bei dem:
 - 5 während des Betriebs des Windparks Betriebsparameter der Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) gemäß einem Optimierungsziel eingestellt werden, wobei das Optimierungsziel der Maximalwert der aus der Summe aller Einzelleistungen (P_i) der Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) gebildeten Gesamtleistung des
10 Windparks ist.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Betriebsparameter, welche gemäß dem Optimierungsziel eingestellt werden, die jeweiligen Neigungswinkel der Rotorblätter der einzelnen Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) umfassen.
15
3. Verfahren nach Anspruch 2, bei dem während des Betriebs des Windparks die jeweiligen Einzelleistungen (P_i) der Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) erfasst werden und die Neigungswinkel der Rotorblätter in Rückkopplung mit den erfassten Einzelleistungen (P_i) gemäß dem Optimierungsziel eingestellt werden.
20
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Optimierungsziel gegeben ist durch eine Optimierung der Windgeschwindigkeits-Verhältnisse (q_i) der Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i), wobei das Windgeschwindigkeits-Verhältnis einer jeweiligen Windkraftanlage (T_1, T_{i-1}, T_i) gegeben ist durch das Verhältnis der zentralen Windgeschwindigkeit unmittelbar nach der jeweiligen Windkraftanlage (T_1, T_{i-1}, T_i) zu der zentralen Windgeschwindigkeit (v_i) unmittelbar vor der jeweiligen Windkraftanlage (T_1, T_{i-1}, T_i).
25
30
5. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem das Windgeschwindigkeits-Verhältnis (q_i) einer jeweiligen Windkraftanlage (T_1, T_{i-1}, T_i) über den Neigungswinkel der Rotorblätter der jeweiligen Windkraftanlage (T_1, T_{i-1}, T_i) eingestellt wird.
35

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Windpark ein linearer Windpark mit einer oder mehreren parallelen Reihen von hintereinander angeordneten, insbesondere baugleichen Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) ist.

5

7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem das Optimierungsziel bei vorgegebener Windgeschwindigkeit (v_1) parallel zu den Reihen von hintereinander angeordneten Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) durch die Maximalleistungen der Reihen von hintereinander angeordneten Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) gegeben ist.

10

8. Verfahren nach Anspruch 7 in Kombination mit Anspruch 4 oder 5, bei dem die Maximalleistung einer jeweiligen Reihe von hintereinander angeordneten Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) durch Optimierung der Windgeschwindigkeits-Verhältnisse (q_i) der jeweiligen Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) einer Reihe gemäß folgender Gleichung bestimmt wird:

15

$$20 \quad \{q_i\}_{opt} = \arg \max \left(\sum_{i=1}^N P_i(q_i | v_i) \right)$$

25

wobei N die Anzahl von Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) in einer Reihe ist und die Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) in einer Reihe in Windrichtung in aufsteigender Reihenfolge nummeriert sind;

30

wobei q_i das Verhältnis der zentralen Windgeschwindigkeit unmittelbar nach der i -ten Windkraftanlage zur zentralen Windgeschwindigkeit v_i unmittelbar vor der i -ten Windkraftanlage ist;

35

wobei $P_i(q_i | v_i)$ die Einzelleistung der i -ten Windkraftanlage in Abhängigkeit von dem Windgeschwindigkeits-Verhältnis q_i bei gegebener zentraler Windgeschwindigkeit v_i unmittelbar vor der i -ten Windkraftanlage ist.

9. Verfahren nach Anspruch 8, bei dem $P_i(q_i|v_i)$ durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$P_i(q_i|v_i) = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v_i^3 \frac{(1+q_i)(1-q_i^2)}{2}$$

5

wobei ρ die Luftdichte ist und R der Radius des Rotors (RO) der i -ten Windkraftanlage (T_1, T_{i-1}, T_i) ist und wobei v_i die zentrale Windgeschwindigkeit unmittelbar vor der i -ten Windkraftanlage ist.

10

10. Verfahren nach Anspruch 9, bei dem die zentrale Windgeschwindigkeit v_i unmittelbar vor der i -ten Windkraftanlage mit Hilfe folgender Formel bestimmt wird:

$$15 \quad \pi \left((R + x \tan \alpha)^2 - R^2 \right) v_{i-1}^* + \pi R^2 q_{i-1} v_{i-1} = \pi (R + x \tan \alpha)^2 v_i, \quad (i \geq 2)$$

wobei R der Radius des Rotors (RO) der $(i-1)$ -ten Windkraftanlage ist;

20 wobei x der Abstand der $(i-1)$ -ten Windkraftanlage zur i -ten Windkraftanlage ist;

wobei v_{i-1}^* die periphere Windgeschwindigkeit am Rand des Rotors (RO) der $(i-1)$ -ten Windkraftanlage ist;

25

wobei α der Neigungswinkel der Nachlaufströmung der $(i-1)$ -ten Windkraftanlage ist.

30 11. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem die periphere Windgeschwindigkeit v_{i-1}^* durch einen Wert abgeschätzt wird, der zwischen der zentralen Windgeschwindigkeit v_{i-1} unmittelbar vor der $(i-1)$ -ten Windkraftanlage und der zentralen Windgeschwindigkeit v_1 unmittelbar vor der ersten Windkraftanlage liegt.

35

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Betriebsparameter gemäß dem Optimierungsziel mit Hilfe eines numerischen Verfahrens, insbesondere eines Gradientenverfahrens, bestimmt werden.

5

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem für eine vorgegebene Anzahl an Referenz-Windbedingungen die Betriebsparameter gemäß dem Optimierungsziel vorgegeben werden.

10

14. Verfahren nach Anspruch 13, bei dem die Einstellung der Betriebsparameter auf der Basis künstlicher Intelligenz erfolgt, insbesondere auf der Basis eines künstlichen neuronalen Netzes und/oder eines probabilistischen Netzes, welche mit Hilfe der Betriebsparameter für die vorgegebene Anzahl an Referenz-Windbedingungen gelernt werden.

15

15. Vorrichtung zum Betrieb eines Windparks mit einer Mehrzahl von Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i), umfassend eine Steuereinheit (S) zum Einstellen von Betriebsparametern der Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) in Abhängigkeit von einem Optimierungsziel, wobei das Optimierungsziel der Maximalwert der aus der Summe aller Einzelleistungen (P_i) der Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) gebildeten Gesamtleistung des Windparks ist.

20

25

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, welche derart ausgestaltet ist, dass der Windpark mit einem Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 14 betreibbar ist.

30

17. Vorrichtung nach Anspruch 15 oder 16, umfassend ein Netz, insbesondere ein drahtgebundenes und/oder drahtloses Netz, über das die Steuereinheit (S) mit den Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) verbunden ist, wobei über das Netz Steuerbefehle zur Einstellung der Betriebsparameter der Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) an die Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) übertragen werden.

35

18. Vorrichtung nach Anspruch 17, wobei über das Netz Werte der Einzelleistungen (P_i) der Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i) an die Steuereinheit (S) gemeldet werden.

- 5 19. Windpark mit einer Mehrzahl von Windkraftanlagen (T_1, T_{i-1}, T_i), umfassend eine Vorrichtung nach einem der Ansprüche 15 bis 18.

FIG 3

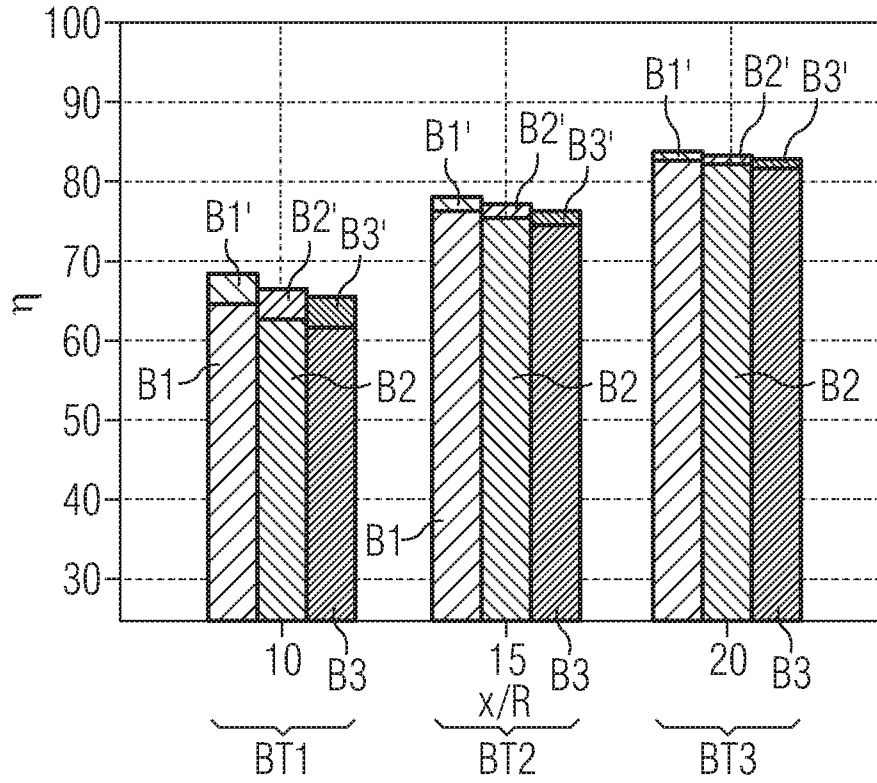


FIG 4

