



(10) **DE 10 2014 213 930 A1** 2016.01.21

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2014 213 930.9**

(22) Anmeldetag: **17.07.2014**

(43) Offenlegungstag: **21.01.2016**

(51) Int Cl.: **F03D 1/06 (2006.01)**

(71) Anmelder:

Wobben Properties GmbH, 26605 Aurich, DE

(74) Vertreter:

**Eisenführ Speiser Patentanwälte Rechtsanwälte
PartGmbH, 28217 Bremen, DE**

(72) Erfinder:

**Kamruzzaman, Mohammad, Southampton, GB;
Altmikus, Andree, 26605 Aurich, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

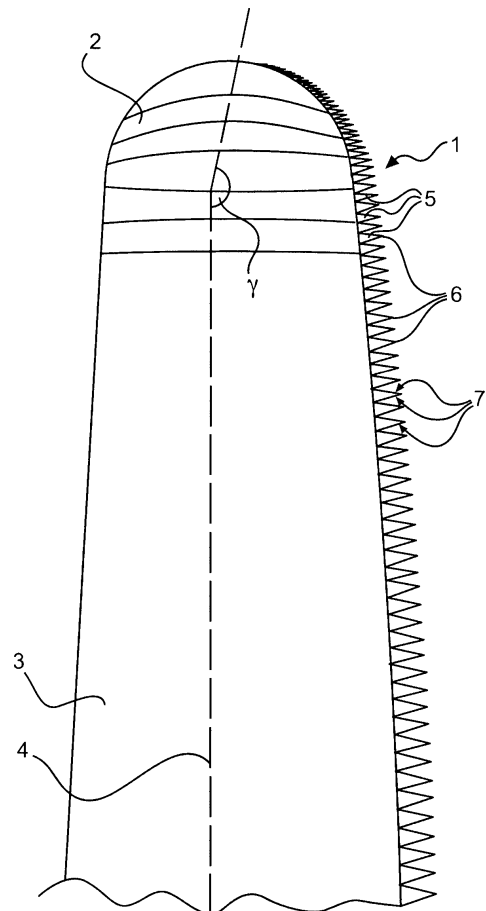
DE	10 2008 037 368	A1
DE	10 2011 050 661	A1
US	2003 / 0 175 121	A1
US	5 088 665	A
EP	1 314 885	B1
EP	0 652 367	A1
WO	2014/ 086 919	A1

Rechercheantrag gemäß § 43 Abs. 1 Satz 1 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Rotorblattspitzenhinterkante**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Hinterkante (1) für eine Rotorblattspitze (2, 52) eines aerodynamischen Rotors (106) einer Windenergieanlage (100). Die Hinterkante (1) umfasst dabei eine Hinterkantenverlaufslinie (50), die die Kontur der Hinterkante (1) abbildet, und mehrere Zacken (5, 55, 59) zur Verbesserung des Strömungsverhaltens an der Hinterkante (1). Dabei sind die Zacken (5, 55, 59) in Abhängigkeit von der Hinterkantenverlaufslinie (50) und somit von Geometrie- und Betriebsparametern an der Hinterkante (1) vorgesehen.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Berechnen einer Zackengeometrie an einer Hinterkante. Weiterhin betrifft die vorliegende Erfindung eine Hinterkante für eine Rotorblattspitze und die Erfindung betrifft eine Rotorblattspitze mit einer Hinterkante. Außerdem betrifft die vorliegende Erfindung eine Windenergieanlage mit wenigstens einem Rotorblatt mit einer Rotorblattspitze und einer erfindungsgemäßen Hinterkante.

[0002] Windenergieanlagen sind allgemein bekannt und **Fig. 1** zeigt eine solche bekannte Windenergieanlage. Für die Effizienz der Windenergieanlage ist das Design des Rotorblatts bzw. der Rotorblätter ein wichtiger Aspekt. Auch die Ausbildung der Rotorblattspitze ist hierbei ein wichtiger Faktor. Bei der Umströmung der Rotorblattspitze werden infolge eines Druckunterschiedes zwischen der Ober- und Unterseite freie Randwirbel erzeugt, aus denen ein Widerstand resultiert. Zudem werden durch diese freien Randwirbel störende Geräusche erzeugt.

[0003] Um diese störenden Geräusche zu reduzieren sind bereits sogenannte Flügelendscheiben, im Folgenden Winglets genannt, bekannt. Unter einem Winglet ist dabei ein Anbau an den Enden eines Rotorblatts zu verstehen, der in einem vorbestimmten Winkel von der Längsachse des Rotorblatts abweicht. Durch solche Winglets kann der Widerstand und die Wirbelbildung an der Rotorblattspitze reduziert werden. Dadurch werden an den Enden der Rotorblätter, also an der Rotorblattspitze, abfallende Wirbel reduziert. Die dadurch entstehenden Geräusche werden somit ebenfalls reduziert. Die Leistung der Windenergieanlage kann gesteigert werden. Nachteilig bei solchen bekannten Winglets ist, dass diese schwierig auszulegen sind, um eine gewünschte Geräuschminderung bzw. Leistungssteigerung zu erreichen. Es besteht die Gefahr, dass ein so großer Aufwand verursacht wird, der in keinem angemessenen Verhältnis zur Wirkung steht.

[0004] Der vorliegenden Erfindung liegt somit die Aufgabe zugrunde, wenigstens eines der oben genannten Probleme zu adressieren. Insbesondere soll eine Lösung vorgeschlagen werden, die die Wirksamkeit eines Rotorblattes einer Windenergieanlage ohne Zunahme von Geräuscheffekten weiter steigert.

[0005] Aufgabe der Erfindung ist es insbesondere, die Geräuschemission einer Windenergieanlage weiter zu verringern. Zumindest soll eine alternative Lösung geschaffen werden.

[0006] Zur Lösung der Aufgabe wird eine Hinterkante für eine Rotorblattspitze eines aerodynamischen Rotors einer Windenergieanlage vorgeschlagen. Die Hinterkante umfasst dabei eine Hinterkantenverlaufslinie,

die die Kontur der Hinterkante abbildet, und mehrere Zacken zur Verbesserung des Strömungsverhaltens an der Hinterkante. Dabei sind die Zacken in Abhängigkeit von der Hinterkantenverlaufslinie an der Hinterkante vorgesehen.

[0007] Die Rotorblattspitze weist über ihre gesamte Länge, also von der Anschlussstelle zum Rotorblatt bis zur Spitze selbst eine Hinterkante mit einer Hinterkantenverlaufslinie auf. Die Hinterkantenverlaufslinie bildet dabei die Kontur der Hinterkante ab, also die Linie, in der sich die Saug- und die Druckseite der Rotorblattspitze treffen. Insbesondere ist eine solche Hinterkantenverlaufslinie eine gekrümmte Linie. An der Hinterkantenverlaufslinie sind die mehreren Zacken nebeneinander angeordnet. Die Zacken sind dabei in Abhängigkeit von der Hinterkantenverlaufslinie vorgesehen bzw. ausgerichtet. D.h., dass die Auslegung der Zacken an der Hinterkante von der Hinterkantenverlaufslinie abhängig ist und somit von der Kontur bzw. der Geometrie der Hinterkante. Demnach werden auch Krümmungen und dergleichen bei der Ausrichtung der Zacken an der Hinterkante berücksichtigt. Dies hat den Vorteil, dass die Zacken optimal an den Hinterkantenverlauf angepasst sind und somit auftretende Wirbel verringert werden können. Dadurch werden ebenfalls die Geräuschemission und ein Leistungsabfall verringert.

[0008] Die Profile bzw. die Geometrien der Rotorblattspitzen und somit auch die Hinterkantenverlaufslinie von Rotorblattspitzen unterschiedlicher Rotorblätter verschiedener Windenergieanlagen-Typen sind unterschiedlich ausgestaltet. Insbesondere sind solche Rotorblattspitzen als sogenannten Winglets ausgestaltet um Geräuschemissionen zu reduzieren. Die Ausgestaltung ist dabei abhängig von den verschiedenen Standorten, an denen unterschiedliche Windverhältnisse wie Starkwind oder Schwachwind vorherrschen können. Dabei ist die Definition der Zacken von den Geometrie- und Betriebsparametern an der Rotorblattspitze bzw. der Windenergieanlage und somit von der Hinterkantenverlaufslinie an der Rotorblattspitze abhängig. Durch die Anordnung der Zacken abhängig von der Hinterkantenverlaufslinie, sind die Zacken individuell an das jeweilige Profil der Rotorblattspitze anpassbar. Die Geräuschemission kann somit optimal reduziert werden und die Leistung der Windenergieanlage gesteigert werden.

[0009] Vorzugsweise ist die Rotorblattspitze als Winglet ausgeführt. Ein Winglet ist dabei eine gebogene Flügelspitze, also ein Teil eines Rotorblattes, der in einem vorbestimmten Winkel von der Längsachse des Rotorblatts abweicht. Das Winglet ist dabei entweder in Richtung der Anströmung oder entgegen der Richtung der Anströmung ausgeführt. Dabei kann die Rotorblattspitze auch als zwei Winglets ausgeführt sein, die in entgegengesetzte Richtungen weisen. Ein solches Winglet reduziert die durch

den Druckunterschied zwischen Ober- und Unterseite bzw. Saug- und Druckseite an der Rotorblattspitze entstehenden Wirbel, indem sie den Randwirbel zerteilen und nach außen ablenken. Dadurch wird die Geräuschemission verringert und die Leistungsaufnahme gesteigert. In Kombination mit einer gezackten Hinterkante, also einer Hinterkante mit mehreren Zacken, können diese Effekte deutlich gesteigert werden.

[0010] In einer bevorzugten Ausführungsform sind die Zacken normal zur Hinterkantenverlaufslinie angeordnet. Dabei weisen die einzelnen Zacken jeweils eine Zackenhöhe auf. Die maximale Zackenhöhe befindet sich hierbei auf einer Normalen zur Hinterkantenverlaufslinie. Solche Zacken können an der Hinterkante auftretende Turbulenzen bzw. dadurch entstehende Wirbel unterschiedlicher Größe auffangen und somit die Geräuschemission verringern. Bei einer gekrümmten Hinterkantenverlaufslinie sind die Zacken entsprechend ungleich ausgerichtet. Sie weisen somit in verschiedene Richtungen.

[0011] In einer besonders bevorzugten Ausführungsform weist jede Zacke wenigstens zwei Zackenkanten auf und die Hinterkante einen Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel, der durch eine Zackenkante und der normal zur Hinterkantenverlaufslinie vorgesehene Anströmungsrichtung definiert ist. Dabei ist der Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel kleiner als 90° , vorzugsweise kleiner als 60° , insbesondere kleiner als 45° . Die genannten Werte erzielen ein optimales Strömungsverhalten an der Hinterkante. Dass der Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel normal zur Hinterkantenverlaufslinie verläuft ist eine theoretische Annahme. In der Realität kann ein solcher Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel durchaus auch durch eine Veränderung der Anströmung größer sein, was nicht zu einem optimalen Strömungsverhalten an der Hinterkante führt. Durch die Ausrichtung der Zacken mit einem Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel kleiner als 90° , insbesondere kleiner als 45° , können solche Änderungen in der Anströmrichtung aber ausgeglichen werden, so dass dies kaum Einfluss auf die Geräuschentwicklung und/oder Leistung der Windenergieanlage nimmt.

[0012] In einer bevorzugten Ausführungsform ist der Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel entlang einer Länge der Rotorblattspitze variabel, wobei die Länge als Länge von dem Anschluss an das Rotorblatt bis zur eigentlichen Spitze definiert ist. D.h., der Winkel zwischen einer Zackenkante und der Anströmrichtung, die normal zur Hinterkantenverlaufslinie vorgesehen ist, ist nicht nur auf einen Wert beschränkt. Vielmehr können sich beispielsweise im Anschlussbereich an das Rotorblatt andere Werte für den Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel ergeben als im Bereich der Rotorblattspitze. Somit kann ein optimales Strömungsverhalten erzielt werden.

[0013] In einer bevorzugten Ausführungsform weist die Rotorblattspitze bzw. das gesamte Rotorblatt eine Pitch-Achse auf und die Zacken sind normal zu der Pitch-Achse angeordnet. Unter der Pitch-Achse des Rotorblattes ist dabei die Achse zu verstehen, um die der Anstellwinkel, also der Pitch, der Rotorblätter verstellt wird. Der Anstellwinkel oder Pitch-Winkel wird verstellt, um die Leistung der Windenergieanlage zu regeln und bei wechselnden Windgeschwindigkeiten jeweils einen optimalen Wirkungsgrad der Windenergieanlage zu erreichen. Die Rotorblattspitze wird dabei ebenfalls um eine solche Pitch-Achse verstellt. Es wird theoretisch angenommen, dass sich die Anströmung normal zu dieser Pitch-Achse bzw. Anstellachse verhält. Eine Ausrichtung der Zacken entsprechend der Pitch-Achse bewirkt eine Reduktion der Wirbel und somit eine Geräuschminderung.

[0014] Vorzugsweise weist die Hinterkante einen Zacken-Pitchwinkel auf, der an einer vorgegebenen Position auf der Hinterkantenverlaufslinie durch eine Tangente definiert ist. Die Hinterkantenverlaufslinie weist für jede Position entlang der Länge der Rotorblattspitze verschiedene Punkte auf. Das Anlegen einer Tangente in den jeweiligen Punkt ergibt viele verschiedene Tangenten und somit verschiedene Zacken-Pitchwinkel entlang der Länge der Rotorblattspitze. Der Winkel zwischen der Pitch-Achse und der jeweiligen Tangente definiert den Zacken-Pitchwinkel. Dieser ist somit ebenfalls in Abhängigkeit der Hinterkantenverlaufslinie berechnet. Durch die Anpassung an die Hinterkantenverlaufslinie können auftretende Wirbel reduziert werden, wodurch auch die Geräuschemission verringert wird.

[0015] Vorzugsweise sind die mehreren Zacken und/oder Zackenkanten entlang einer bzw. der Länge der Rotorblattspitze an der Hinterkante unsymmetrisch angeordnet. Dadurch, dass die Hinterkantenverlaufslinie eine gekrümmte Form aufweisen kann und die Zacken abhängig von der Hinterkantenverlaufslinie ausgerichtet sind, sind die Zacken an verschiedenen Positionen entlang der Rotorblattlänge verschieden ausgerichtet und somit nicht symmetrisch, also die einzelnen Zackenkanten weisen nicht denselben Winkel zur Hinterkantenverlaufslinie bzw. Anströmung auf. Insbesondere die zwei Zackenkanten einer Zacke können dabei im Verhältnis zu der Anströmung verschiedene Winkel aufweisen. Dadurch können Wirbel unterschiedlicher Größe und Art reduziert werden.

[0016] In einer besonders bevorzugten Ausführungsform verläuft die Hinterkantenverlaufslinie zumindest teilweise über die Länge der Rotorblattspitze gekrümmt, also nicht gerade. Da aerodynamische Profile – wie die Profile einer erfindungsgemäßen Rotorblattspitze – eine sehr komplexe Geometrie zur Erzielung der optimalen Leistung aufweisen, ist es teilweise notwendig, dass die Hinterkantenverlaufslinie

an einigen Stellen entlang der Länge der Rotorblattspitze nicht gerade, also gekrümmt verlaufen. Dadurch, dass die Zacken an die Hinterkantenverlaufslinie angepasst sind bzw. abhängig davon berechnet sind, wird eine solche Krümmung mit berücksichtigt. Die Rotorblattspitze kann somit hinsichtlich ihres Profils und der optimalen Anordnung der Zacken an der Hinterkante bzw. der Zackengeometrie ausgelegt werden.

[0017] Vorzugsweise weist das Rotorblatt einen Anschlussbereich an das Rotorblatt und einen Spitzenbereich auf, wobei der Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel bei den Zackenkanten, die zum Anschlussbereich zeigen, von dem Anschlussbereich zum Spitzenbereich zunimmt und/oder bei den Zacken, die von dem Anschlussbereich wegzeigen, von dem Anschlussbereich zum Spitzenbereich abnimmt. D.h., der Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel verringert sich einerseits auf der Seite der Zacken, die in Richtung des Spitzenbereichs zeigen und erhöht sich andererseits auf der Seite der Zacken, die dem Anschlussbereich zugewandt sind. Unter dem Spitzenbereich wird dabei vorliegend der Bereich der Rotorblattspitze verstanden, der dem Anschlussbereich gegenüber liegt.

[0018] Da aufgrund der verschiedenen Anströmbedingungen, wie Reynoldzahl, Machzahl, Anstellwinkel usw. an der Rotorblattwurzel und der Rotorblattspitze auftreten, werden nahe der Hinterkante Wirbel in verschiedenen Größen erzeugt. Für große Wirbel sind beispielsweise große Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel effektiv und für kleine Wirbel kleine Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel. Durch die erfindungsgemäße Anordnung können somit die kleinen und die großen Wirbel abgedeckt werden. Zudem weist eine solche Anordnung bei mittel großen Wirbeln zumindest eine durchschnittlich gute Effektivität auf.

[0019] Zudem wird zur Lösung der Aufgabe eine Rotorblattspitze für ein Rotorblatt für eine Windenergieanlage vorgeschlagen, wobei die Rotorblattspitze wenigstens eine Hinterkante gemäß einer der vorstehenden Ausführungsformen aufweist. Es ergeben sich somit die Zusammenhänge, Erläuterungen und Vorteile gemäß wenigstens einer Ausführungsform der beschriebenen Hinterkante.

[0020] Eine solche Rotorblattspitze ist dabei insbesondere für ein Rotorblatt eines Luvläufers mit aktiver Blattverstellung vorgesehen. Die Rotorblattspitze kann dabei bei Windenergieanlagen aller Leistungsklassen, insbesondere in einem Megawatt-Bereich verwendet werden.

[0021] Weiterhin wird eine Windenergieanlage mit wenigstens einem Rotorblatt mit einer erfindungsgemäßen Rotorblattspitze, vorzugsweise mit drei Rotor-

blättern, jeweils mit einer erfindungsgemäßen Rotorblattspitze vorgeschlagen.

[0022] Ferner wird ein Verfahren zum Berechnen einer Zackengeometrie an einer Hinterkante einer Rotorblattspitze eines Rotorblatts eines aerodynamischen Rotors einer Windenergieanlage vorgeschlagen. Dabei weist die Hinterkante eine Hinterkantenverlaufslinie auf, die die Kontur der Hinterkante abbildet, und die Zackengeometrie wird in Abhängigkeit von der Hinterkantenverlaufslinie berechnet. Jede Zacke weist dabei eine Zackenhöhe, Zackenbreite und wenigstens zwei Zackenkanten auf. Die Zackenkanten verlaufen dabei von der Zackenbreite zur Zackenspitze. Sie können sich in der Zackenspitze berühren oder alternativ kann die Zackenspitze auch rund oder mit einer weiteren Kante ausgeführt sein. Die Zackengeometrie wird durch das vorliegende Verfahren insbesondere über die Anordnung der Zackenkanten zu der Hinterkantenverlaufslinie definiert.

[0023] Es ergeben sich somit die Zusammenhänge, Erläuterungen und Vorteile gemäß wenigstens einer Ausführungsform der beschriebenen Hinterkante.

[0024] Vorzugsweise wird bei dem erfindungsgemäßen Verfahren

- die lokale Anströmung als Normale zu dem Hinterkantenverlauf angenommen und/oder
- ein Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel, der durch die Anströmung und eine Zackenkante definiert ist, berechnet,

wobei der Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel kleiner als 90° ist, vorzugsweise kleiner als 60° , insbesondere kleiner als 45° .

[0025] In einer bevorzugten Ausführungsform wird bei einem erfindungsgemäßen Verfahren

- die Anströmungsrichtung als normal zur Pitch-Achse des Rotorblatts angenommen und/oder
- mehrere Zacken werden normal zur Pitch-Achse ausgerichtet,

wobei ein Zacken-Pitchwinkel berechnet wird, der zwischen der Pitch-Achse und einer Zackenkante dem Winkel einer Tangente an einer Position der Hinterkante entspricht.

[0026] Die Hinterkantenverlaufslinie weist für jede Position entlang der Länge der Rotorblattspitze verschiedene Punkte auf. Das Anlegen einer Tangente in den jeweiligen Punkt ergibt viele verschiedene Tangenten und somit verschiedene Zacken-Pitchwinkel entlang der Länge der Rotorblattspitze. Der Winkel zwischen der Pitch-Achse und der jeweiligen Tangente definiert den Zacken-Pitchwinkel. Dieser ist somit ebenfalls in Abhängigkeit der Hinterkantenverlaufslinie berechnet. Durch die Anpassung an die Hin-

terkantenverlaufslinie können auftretende Wirbel reduziert werden, wodurch auch die Geräuschemission verringert wird.

[0027] In einer bevorzugten Ausführungsform wird das Verfahren zum Berechnen einer Zackengeometrie für eine Hinterkante nach wenigstens einer der vorher beschriebenen Ausführungsformen verwendet.

[0028] Den Berechnungen liegen dabei folgende Überlegungen zugrunde.

[0029] Die Strouhal-Zahl ist sehr viel kleiner als 1. Die Strouhal-Zahl ist dabei eine dimensionslose Kenngröße der Aerodynamik, mit der bei instationärer Strömung die Ablösefrequenz von Wirbeln beschrieben werden kann. Die Strouhal-Zahl wird unter anderem von der Zackenhöhe beeinflusst. Für die Zackenhöhe ergibt sich dabei der folgende Zusammenhang:

$$H\left(\frac{c}{R}\right) = 2h = c2 \cdot \Lambda_{p3}\left(\frac{c}{R}\right)$$

[0030] $c2$ ist dabei gleich 2 bis 15 und eine Konstante. Die Zackenhöhe berechnet sich somit aus der Kohärenzlängenskala Λ_{p3} der turbulenten Druckfluktuation unter der Verwendung eines konstanten Faktors $c2$. Der Faktor $c2$ kann empirisch ermittelt werden, bspw. aus Testmessungen oder aus Erfahrungswerten.

[0031] Das Verhältnis der Zackenhöhe zu der Zackenbreite wird als $\frac{H}{\lambda} > 0,5$ angenommen, wobei $\lambda = H/c3$ ist und $c3 = 0,5$ bis 6 eine empirische Konstante ist.

[0032] Der Winkel zwischen der lokalen Anströmrichtung und der Zackenkante, also der Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel ist $\Phi_i < 90^\circ$. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Anströmung normal zu der Pitch-Achse des Rotorblatts ist, vorliegend also $\Phi_i = \Phi \pm \theta_i$. Wobei θ_i der Zacken-Pitchwinkel ist. Dabei variiert der Zacken-Pitchwinkel θ_i entlang der Länge der Rotorblattspitze abhängig von dem Hinterkantenverlauf.

[0033] Nachfolgend wird die Erfindung exemplarisch anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die begleitenden Figuren näher erläutert.

[0034] Fig. 1 zeigt eine Windenergieanlage schematisch in einer perspektivischen Ansicht.

[0035] Fig. 2 zeigt schematisch einen Rotorblattabschnitt mit einer Rotorblattspitze mit einer Hinterkante mit einem gezackten Verlauf.

[0036] Fig. 3 zeigt schematisch eine Rotorblattspitze mit einer Hinterkante mit einem gezackten Verlauf.

[0037] Fig. 4 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt der Rotorblattspitze aus Fig. 3.

[0038] Fig. 5 zeigt einen weiteren vergrößerten Ausschnitt der Rotorblattspitze der Fig. 3.

[0039] Fig. 6 zeigt schematisch eine Rotorblattspitze mit zwei verschiedenen Zackengeometrien an der Hinterkante.

[0040] Fig. 7 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt der Rotorblattspitze aus Fig. 6.

[0041] Fig. 8 zeigt schematisch eine Rotorblattspitze.

[0042] Es ist zu beachten, dass gleiche Bezugszeichen eventuell ähnliche, aber nicht identische Elemente auch unterschiedlicher Ausführungsformen bezeichnen können.

[0043] Die Erläuterung der Erfindung anhand von Beispielen unter Bezugnahme auf die Figuren erfolgt im Wesentlichen schematisch und die Elemente, die in der jeweiligen Figur erläutert werden, können darin zur besseren Veranschaulichung überzeichnet und andere Elemente vereinfacht sein. So veranschaulicht beispielsweise Fig. 1 eine Windenergieanlage als solche schematisch, so dass die vorgesehene zackenförmige Hinterkante an der Rotorblattspitze sowie die Winglet-Form der Rotorblattspitze nicht eindeutig erkennbar ist.

[0044] Fig. 1 zeigt eine Windenergieanlage **100** mit einem Turm **102** und einer Gondel **104**. An der Gondel **104** ist ein Rotor **106** mit drei Rotorblättern **108** und einem Spinner **110** angeordnet. Der Rotor **106** wird im Betrieb durch den Wind in eine Drehbewegung versetzt und treibt dadurch einen Generator in der Gondel **104** an.

[0045] Fig. 2 zeigt schematisch einen Ausschnitt eines Rotorblattabschnitts **3** mit einer Rotorblattspitze **2** mit einer Rotorblatthinterkante **1**, die vereinfachend auch als Hinterkante bezeichnet wird. Die Rotorblattspitze **2** führt von einem Rotorblattabschnitt **3** mit einem Winkel γ , bezogen auf die Längsachse **4** des Rotorblattabschnitts **3**, in eine von der Längsachse **4** abweichende Richtung. Bei der Rotorblattspitze **2** handelt es sich somit um ein sog. Winglet. An der Rotorblattspitze **2** ist eine Hinterkante **1** vorgesehen, die einen gezackten Verlauf mit mehreren Zacken **5** aufweist, die entlang der Rotorblattspitze **2** und des Rotorblattabschnitts **3** nebeneinander angeordnet sind. Jede Zacke **5** weist jeweils eine Zackenspitze **6** auf sowie zwei Zackenkanten, die sich in der Zackenspitze **6** berühren. Jeweils eine Seite einer Zackenkante **7** berührt ebenfalls eine benachbarte Zackenkante **7** und berührt auf der entgegengesetzten Seite, also im Bereich der Zackenspitze **6** wieder die zweite zu der

jeweiligen Zacke **5** gehörigen Zackenkante **7** usw. Es sei angemerkt, dass der dargestellte Ausschnitt der Rotorblattspitze **2** nur ein Ausführungsbeispiel ist. Die Zacken **5** können alternativ nur in einem Abschnitt der Rotorblattspitze **2** oder nur an der Rotorblattspitze **2** vorgesehen sein. Ferner ist es möglich, dass die Zacken **5** auch weiter über die Hinterkante des gesamten Rotorblatts verlaufen.

[0046] Fig. 3 zeigt eine Hinterkantenverlaufslinie, die im Folgenden auch einfach als Hinterkantenverlauf **50** bezeichnet wird, einer Rotorblattspitze **52** wie sie beispielsweise in Fig. 2 abgebildet ist. Die Kurve MOEN kennzeichnet den Hinterkantenverlauf **50** der Rotorblattspitze **52** an verschiedenen radialen Positionen des Rotorblatts, also entlang der Spannweite des Rotorblatts. In Fig. 3 sind mehrere Zacken **55** zu erkennen, die jeweils eine Zackenspitze **56** und zwei Zackenkanten **57** aufweisen. Die Größe der Zacken **55** nimmt ausgehend von Punkt M bis zum Punkt N ab. Die Zacken **55** sind über den gesamten Hinterkantenverlauf **50** der Rotorblattspitze **52** angeordnet.

[0047] In Fig. 3 ist zudem die Richtung der lokalen Anströmung A' und A zu erkennen. Die lokale Anströmungsrichtung A' und A unterscheidet sich durch zwei verschiedene Annahmen. Bei der lokalen Anströmungsrichtung A' wird angenommen, dass sie normal zu der Hinterkante verläuft. Die lokale Anströmungsrichtung A ist normal zu der Pitch-Achse des Rotorblatts vorgesehen.

[0048] Fig. 4 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt der Rotorblattspitze **52** aus Fig. 3. Entlang des Hinterkantenverlaufs **50** sind mehrere Zacken **55** angeordnet, die jeweils eine Zackenspitze **56** sowie jeweils zwei Zackenkanten **57** aufweisen. Zudem weisen die Zacken **55** eine Zackenhöhe H sowie eine Zackenbreite λ auf. Die Zackenkante **57** bildet an dem Punkt E gemeinsam mit der lokalen Anströmungsrichtung A' einen Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel Φ_E . Für eine gegebene Definition der Zackenhöhe H_E und Weite λ_E an dem Punkt E kann der Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel Φ_E errechnet werden. Aus dem Dreieck EFG in Fig. 4 ergibt sich:

$$\tan(\Phi_E) = \frac{\lambda_E/2}{H_E} = \frac{\lambda_E}{2H_E}$$

und mit $\frac{H_E}{\lambda_E} = 2$ folgt

$$\tan(\Phi_E) = \frac{\lambda_E}{2H_E} = \frac{1}{4}. \text{ Daraus folgt}$$

$$\Phi_E = 14,03^\circ.$$

[0049] Wenn somit entlang der gesamten Länge der Rotorblattspitze das Verhältnis $H_E/\lambda_E = 2$ konstant bleibt, bleibt $\Phi_E = 14,03$ ebenfalls konstant. Es hat sich gezeigt, dass die maximale Lärmreduktion erzielt werden kann, wenn der Winkel zwischen der Hauptanströmungsrichtung und der Zackenkante (bzw. Linie EG in Fig. 4) weniger als 90° , insbesondere weniger als 45° ist. Somit liegt der für Fig. 3 berechnete Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel Φ_E in dem genannten Bereich. Es ist ebenfalls möglich, den Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel Φ zu variieren, z.B. durch die Variation des Verhältnisses von H/λ oder der Anströmungsrichtung. Bei der Variation von $H/\lambda = [0,5, 1, 2, 4, 6, 8]$ und der Annahme, dass die Anströmungsrichtung konstant ist, würde für Φ die folgenden Werte ergeben: $45; 26,56; 14,03; 7,12; 4,76; 3,57$ Grad. Dies setzt voraus, dass die Anströmungsrichtung unverändert bleibt. Die lokale Strömungsrichtung variiert aber bei Betrieb der Windenergieanlage.

[0050] Daher wird eine Beziehung zwischen der Linie $A'E$ und AE hergestellt. Dies erlaubt eine Verteilung von nicht-symmetrischen Zackengeometrien, in denen der Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel Φ entlang der Spannweite der Rotorblattspitze variiert. Fig. 5 zeigt dabei einen vergrößerten Ausschnitt der Rotorblattspitze **52** mit dem Hinterkantenverlauf **50** aus Fig. 4. Zusätzlich zu Fig. 4 zeigt Fig. 5 eine durch den Punkt E durchgehende Tangente **58**. Die Zacken **55** sind normal zur Hinterkante ausgerichtet. Die normale zu der Hinterkante erzeugt einen Zacken-Pitchwinkel θ_E mit der Anströmungsrichtung normal zur Pitch-Achse. Der Zacken-Pitchwinkel θ_E wird über die Tangente an dem Punkt E (Linie XE, **58**) ermittelt. Wenn die Tangente **58** an jeder Position der Hinterkante **50** verschieden ist, variiert der Zacken-Pitchwinkel θ_E vom Beginn der Rotorblattspitze **52** bis zum Ende der Rotorblattspitze **52** bzw. von der Rotorblattwurzel bis hin zur Rotorblattspitze abhängig von dem jeweiligen Hinterkantenverlauf. Es kann aus Fig. 5, insbesondere an den Positionen E und I, erkannt werden, dass der Winkel zwischen der lokalen Anströmungsrichtung und den Zackenkanten **57** sich aus

$\Phi_E + \theta_E$ bzw. $\Phi_I - \theta_I$ berechnet. Die Zackenkanten **57** sind nicht symmetrisch über die Anströmungsrichtungslinie AE, weil der Winkel $\Phi + \theta_E$ nicht identisch zu dem Winkel $\Phi - \theta_I$ ist. Dies zeigt an, dass der lokale Anströmungswinkel zwischen der Anströmungsrichtung und der Zackenkante **57** an dem Punkt E und an dem Punkt I nicht identisch sein wird. Dies gilt nur, wenn die lokale Anströmungsrichtung normal zu der Pitch-Achse wie in Fig. 4 ist.

[0051] Die exakte lokale Anströmungsrichtung ist allerdings immer unbekannt. Sie kann bestenfalls durch eine Annahme angenähert werden. Daher ist es ebenfalls möglich, die Zackengeometrie derart zu ändern, dass ein optimales Φ und H/λ erzielt wird. Fig. 6 zeigt dabei schematisch einen Ausschnitt einer Rotorblattspitze **52** mit zwei verschiedenen Zackengeometrien. Die erste Geometrie, nämlich die Zacken **55** werden normal zu der Hinterkante der Rotorblattspitze **52** ausgerichtet. Die zweite Geometrie, nämlich die Zacken **59** werden normal zu der Pitch-Achse des Rotorblatts ausgerichtet. Die Zacken **59** sind dabei als strichpunktierte Linie abgebildet. Für diesen Fall ist der Winkel zwischen der Anströmungsrichtung und der Zackenkante an Punkt E und I θ_E bzw. θ_I . Die Zackengeometrie wird über eine Koordinatentransformation der Zackendaten von den Zacken, die normal zur Hinterkante angeordnet sind, durchgeführt. Dies ist schematisch in dem vergrößerten Ausschnitt der Rotorblattspitze **52** in Fig. 7 zu erkennen.

[0052] Geräuschfeldmessungen wurden für drei Rotorblattkonfigurationen durchgeführt: 1. für ein Rotorblatt ohne Zacken, 2. für ein Rotorblatt mit Zacken, die normal zur Rotorblatthinterkante ausgerichtet sind und 3. für ein Rotorblatt mit Zacken, die normal zur Pitch-Achse ausgerichtet sind. Die Daten haben ergeben, dass die jeweiligen Rotorblätter mit den Zacken an der Rotorblattspitze geräuschärmer waren als die Rotorblätter ohne Zacken an der Rotorblattspitze. Besonders bevorzugt ist zudem die Ausrichtung der Zacken abhängig von dem Hinterkantenverlauf der Rotorblattspitze. Diese Anordnung erzielt besonders gute Geräuschreduzierungen beispielsweise bei Zunahme, insbesondere in radialer Position $i = 1, 3, 5 \dots N - 1$, und Abnahme, insbesondere in radialer Position $i = 2, 4, 6, \dots N$, des Zacken-Hinterkantenverlaufswinkels Φ_i entlang der Spannweite. Dies resultiert daher, dass aufgrund verschiedener lokaler Anströmungsbedingungen wie verschiedene Reynoldszahlen, Machzahlen und Anstellwinkel an den verschiedenen Positionen der Rotorblattspitze verschieden große Wirbel nahe der Hinterkante erzeugt werden, d.h. für größere turbulente Wirbel sind Zacken mit einem Φ_i effektiver, wie beispielsweise am Punkt E $i = 17$ als kleinere Winkel. Für kleinere Wirbel sind Zacken mit kleinem Φ_i , z.B. am Punkt I, $i = 18$, effektiver als Zacken mit einem großen Winkel. Andererseits sind für mittelgroße Wirbel beide

Zackengeometrien effektiv. Für optimale Ergebnisse sollten zudem die folgenden Bedingungen erfüllt sein:

I. Die Strouhal-Zahl $wh/U_c \gg 1$, wobei $H(\frac{r}{R}) = 2h = c2 \cdot \Lambda_{p3}(\frac{r}{R})$ ist, und $c2 = 2$ bis 15 eine Konstante ist,

II. Länge zu Weiteverhältnis $\frac{H}{\lambda} > 0,5$, wobei $\lambda = H/c3$ ist und $c3 = 0,5$ bis 6 eine empirische Konstante ist,

III. der Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel zwischen der lokalen Anströmrichtung und der Zackenkante $\Phi_i < 90^\circ$, dabei wird vorausgesetzt, dass die Anströmung normal zu der Pitch-Achse des Rotorblatts ist, vorliegend also $\Phi_i = \Phi \pm \theta_i$ gemäß Fig. 5. Dabei variiert der Zacken-Pitchwinkel θ_i entlang der Spannweite abhängig von dem Hinterkantenverlauf.

[0053] Fig. 8 zeigt zusätzlich zu Fig. 6 eine Turbulenz bzw. eine Wirbel **60**, der sich der Hinterkante nähert. Nach den theoretischen Annahmen würde sich die Turbulenz **60** weiter in Richtung Z bewegen. In Realität würde die Turbulenz **60** sich jedoch weiter in Richtung Z' bewegen. Eine solche Turbulenz ist dabei ein unerwartetes, unstetiges aerodynamisches Phänomen, das in der Realität durchaus auftreten kann. In solchen Situationen wird die Bedingung $\Phi_i < 90^\circ$ gestört. Die dargestellten Zacken **55** und **59** können aber auch solche Turbulenzen **60** ausgleichen und reduzieren somit auch noch im Falle einer solchen Turbulenz **60** die Geräuschentwicklung am Rotorblatt, insbesondere an der Rotorblattspitze **52**.

Patentansprüche

- Hinterkante (1) für eine Rotorblattspitze (2, 52) eines aerodynamischen Rotors (106) einer Windenergieanlage (100), umfassend:
 - eine Hinterkantenverlaufslinie (50), die die Kontur der Hinterkante (1) abbildet,
 - mehrere Zacken zur Verbesserung des Strömungsverhaltens an der Hinterkante (1),
 wobei die Zacken (5, 55, 59) in Abhängigkeit von der Hinterkantenverlaufslinie (50) an der Hinterkante (1) vorgesehen sind.
- Hinterkante (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Rotorblattspitze (2, 52) als Winglet ausgeführt ist.
- Hinterkante (1) nach einem der Ansprüche 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Zacken (5, 55, 59) normal zur Hinterkantenverlaufslinie (50) angeordnet sind.
- Hinterkante (1) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 - jede Zacke (5, 55, 59) wenigstens zwei Zackenkanten (7, 50, 57) aufweist und

– die Hinterkante (1) einen Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel aufweist, der durch eine Zackenkante (7, 50, 57) und einer normal zur Hinterkantenverlaufslinie (50) vorgesehenen Anströmrichtung (A, A') definiert ist,

wobei der Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel kleiner als 90° ist, insbesondere kleiner als 45° ist.

5. Hinterkante (1) nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel entlang einer Länge der Rotorblattspitze (2, 52) variabel ist.

6. Hinterkante (1) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Rotorblattspitze (2, 52) eine Pitch-Achse aufweist und die Zacken (5, 55, 59) normal zur Pitch-Achse angeordnet sind.

7. Hinterkante (1) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Hinterkante (1) einen Zacken-Pitchwinkel aufweist, der an einer vorgegebenen Position auf der Hinterkantenverlaufslinie (50) durch eine Tangente (58) definiert ist.

8. Hinterkante (1) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die mehreren Zacken (5, 55, 59) und/oder Zackenkanten (7, 50, 57) entlang einer bzw. der Länge der Rotorblattspitze (2, 52) an der Hinterkante (1) unsymmetrisch angeordnet sind.

9. Hinterkante (1) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Hinterkantenverlaufslinie (50) zumindest teilweise über die Länge der Rotorblattspitze (2, 52) gekrümmt verläuft.

10. Hinterkante (1) nach einem der vorstehenden Ansprüche 4 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Rotorblattspitze (2, 52) einen Anschlussbereich an ein Rotorblatt (108) und einen Spitzenbereich aufweist, wobei der Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel bei den Zackenkanten (7, 50, 57), die zum Anschlussbereich zeigen, von dem Anschlussbereich zum Spitzenbereich zunimmt und/oder bei den Zacken (5, 55, 59), die von dem Anschlussbereich wegzeigen, von dem Anschlussbereich zum Spitzenbereich abnimmt.

11. Rotorblattspitze (2, 52) für ein Rotorblatt (108) für eine Windenergieanlage (100), umfassend wenigstens eine Hinterkante (1) gemäß einem der vorstehenden Ansprüche.

12. Windenergieanlage (100) mit wenigstens einem Rotorblatt (108) mit einer Rotorblattspitze (2, 52) nach Anspruch 11, vorzugsweise mit drei Rotorblättern (108), jeweils mit einer Rotorblattspitze (2, 52) nach Anspruch 11.

13. Verfahren zum Berechnen einer Zackengeometrie an einer Hinterkante (1) einer Rotorblattspitze (2, 52) eines Rotorblatts (108) eines aerodynamischen Rotors (106) einer Windenergieanlage (100), wobei

– die Hinterkante (1) eine Hinterkantenverlaufslinie (50) aufweist, die die Kontur der Hinterkante (1) abbildet, und

– die Zackengeometrie in Abhängigkeit von der Hinterkantenverlaufslinie (50) berechnet wird.

14. Verfahren nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass

– die lokale Anströmung (A, A') als Normale zu dem Hinterkantenverlauf (50) angenommen wird und/oder

– ein Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel, der durch die Anströmung (A, A') und eine Zackenkante (7, 50, 57) definiert ist, berechnet wird,

wobei der Zacken-Hinterkantenverlaufswinkel kleiner als 90° ist, insbesondere kleiner als 45°.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 oder 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass

– die lokale Anströmungsrichtung (A, A') als normal zur Pitch-Achse des Rotorblatts (108) angenommen wird und/oder

– mehrere Zacken (5, 55, 59) normal zur Pitch-Achse ausgerichtet werden,

wobei ein Zacken-Pitchwinkel berechnet wird, der zwischen der Pitch-Achse und einer Zackenkante (7, 50, 57) dem Winkel einer Tangente (58) an einer Position der Hinterkante (1) entspricht.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Verfahren zum Berechnen einer Zackengeometrie einer Hinterkante (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 10 verwendet wird.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

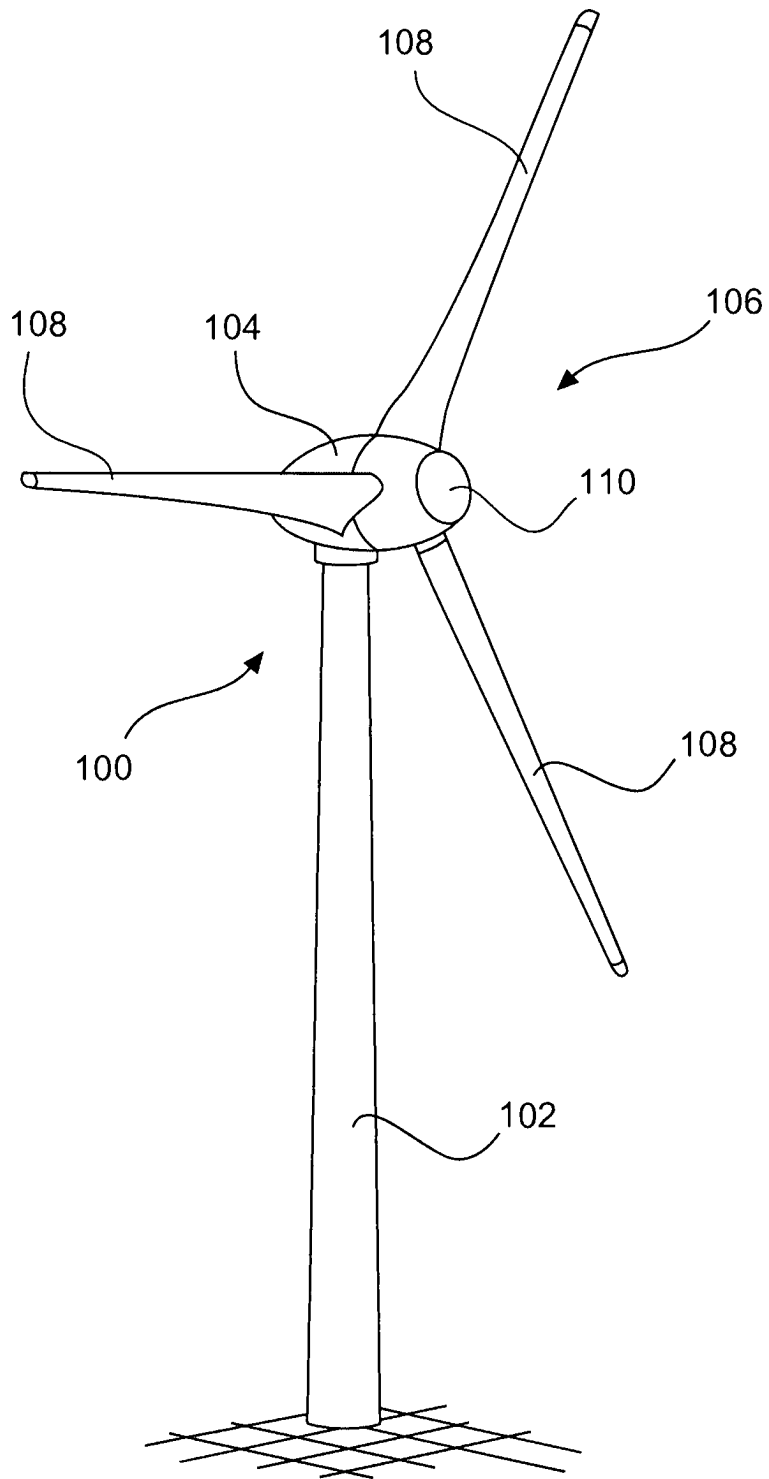


Fig. 1

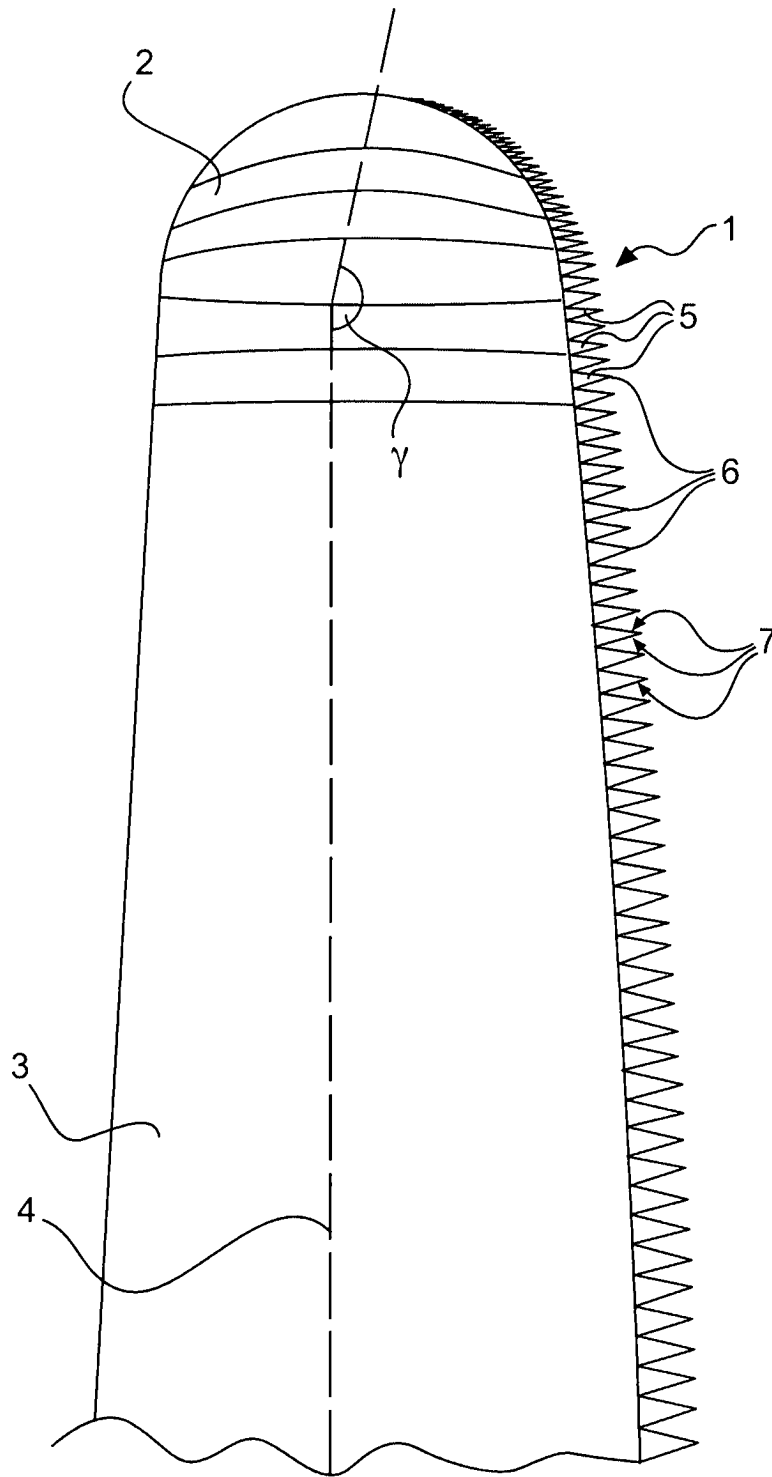


Fig. 2

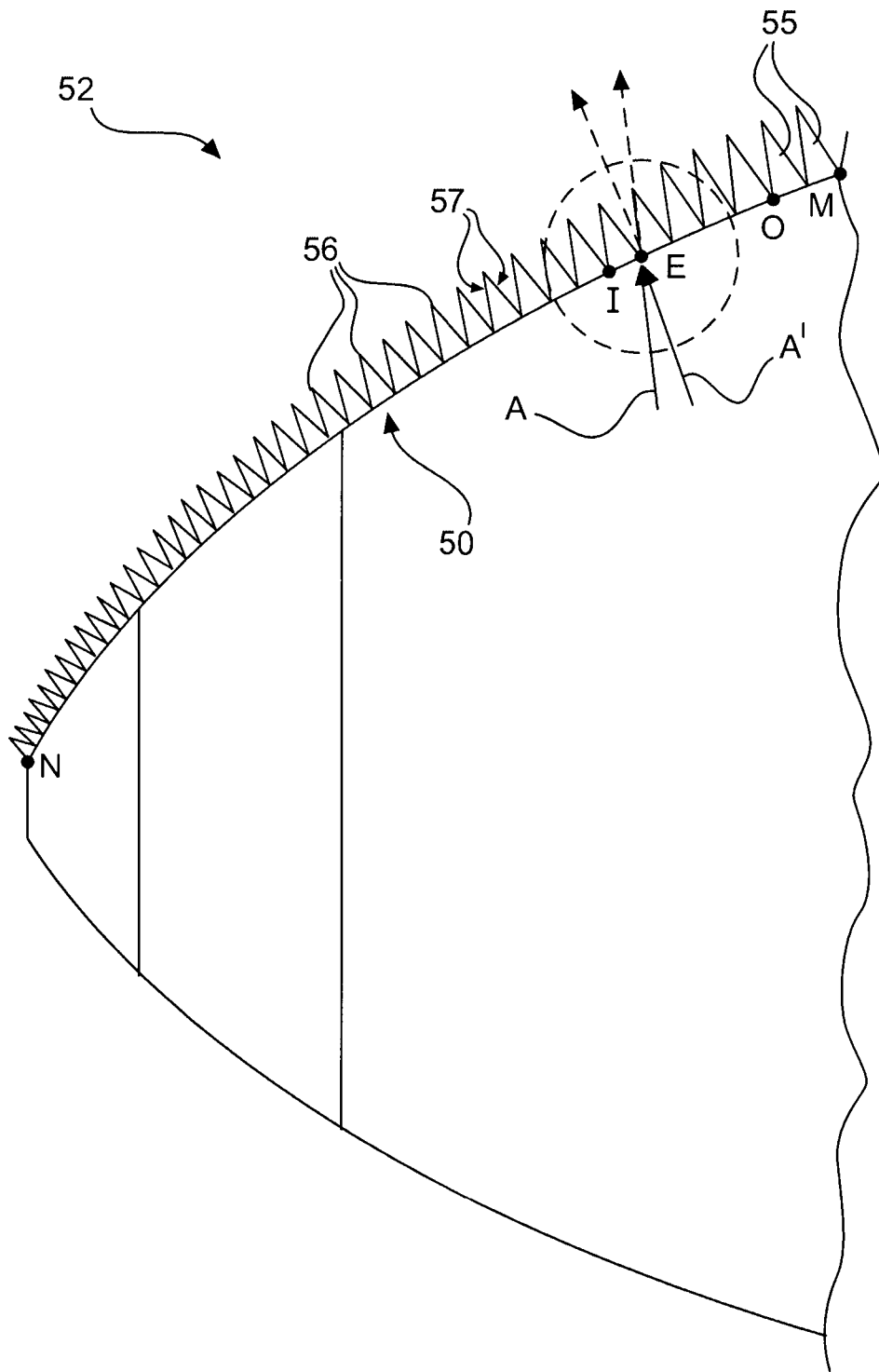


Fig. 3

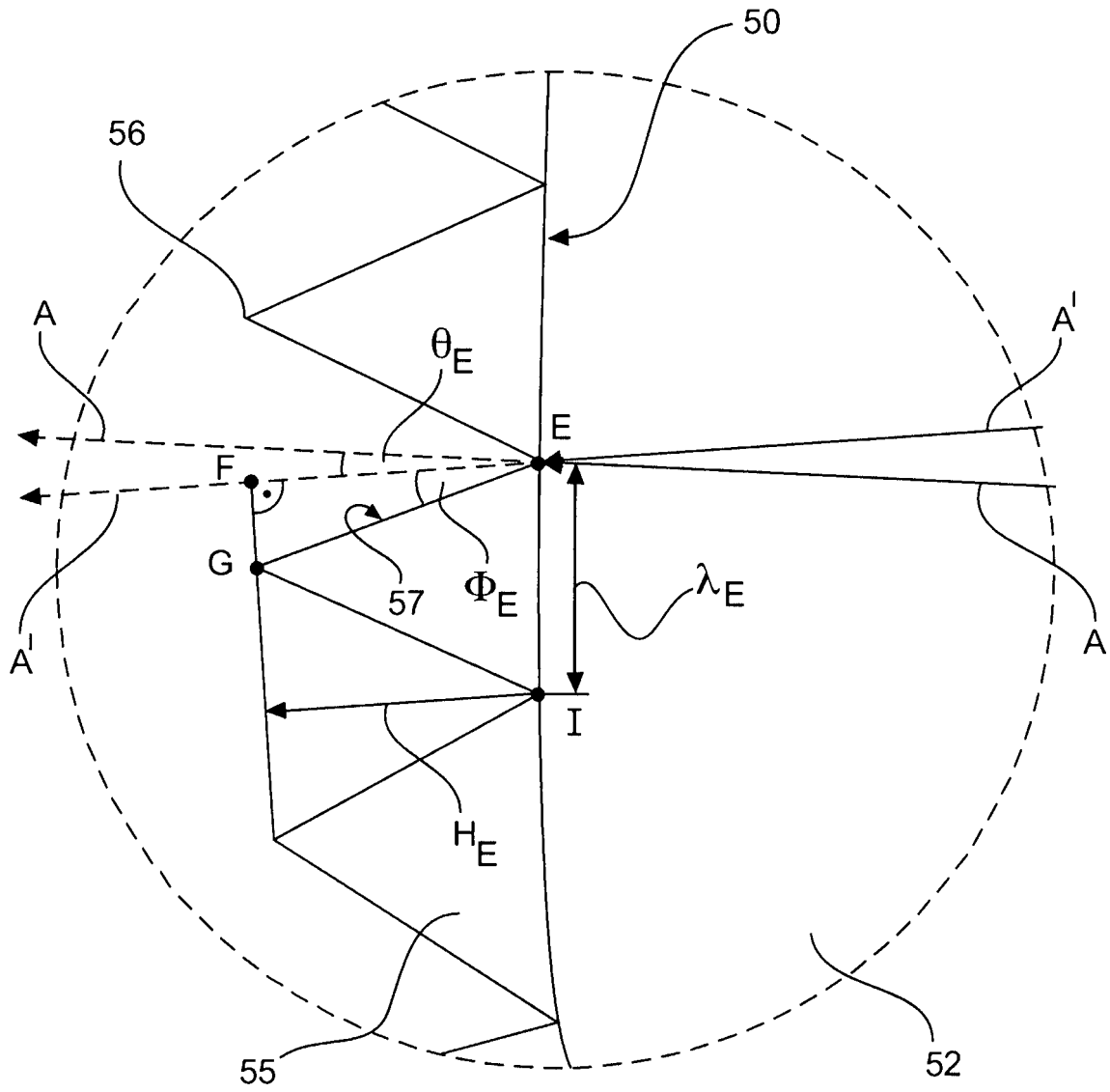


Fig.4

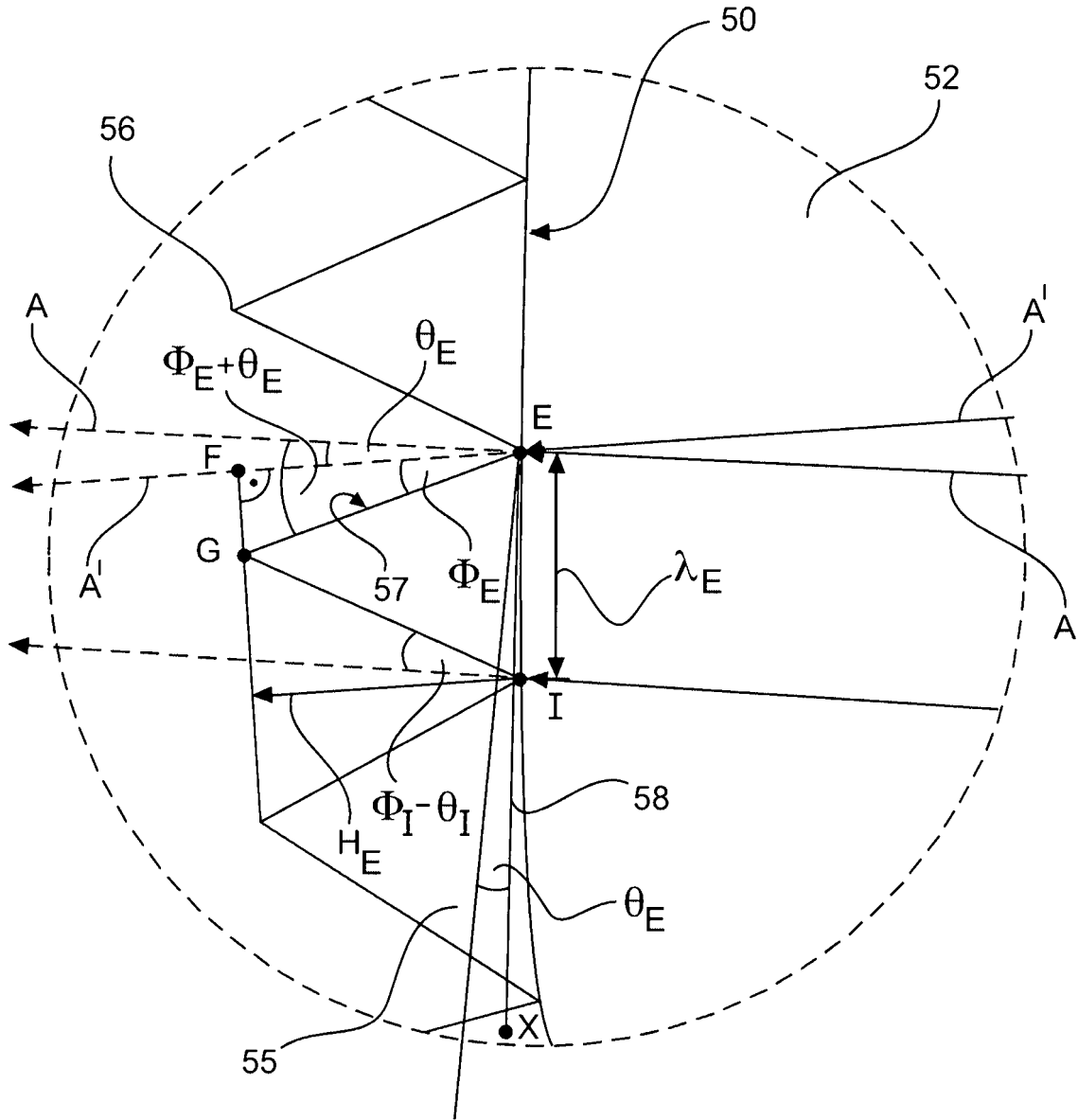


Fig. 5

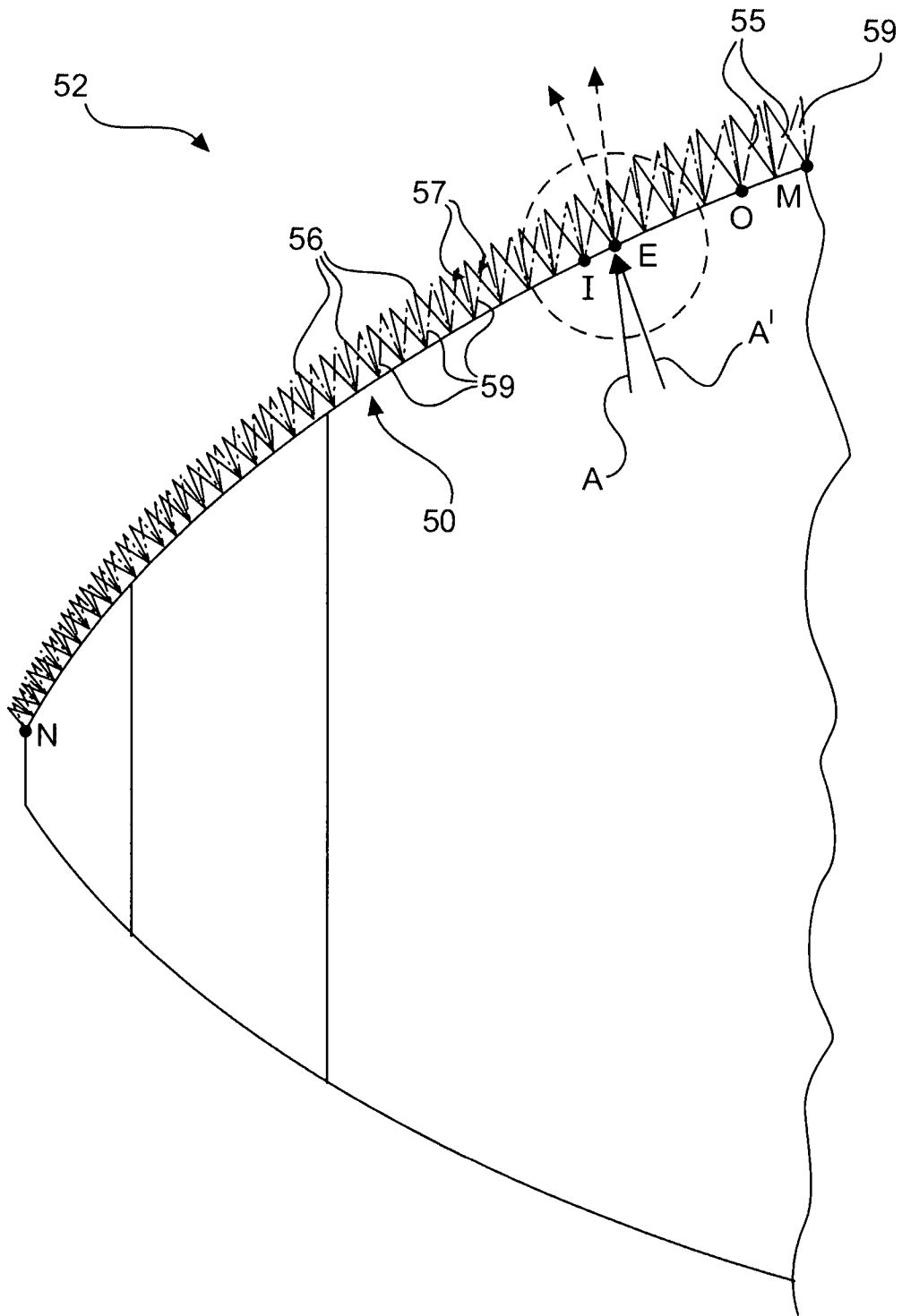


Fig. 6

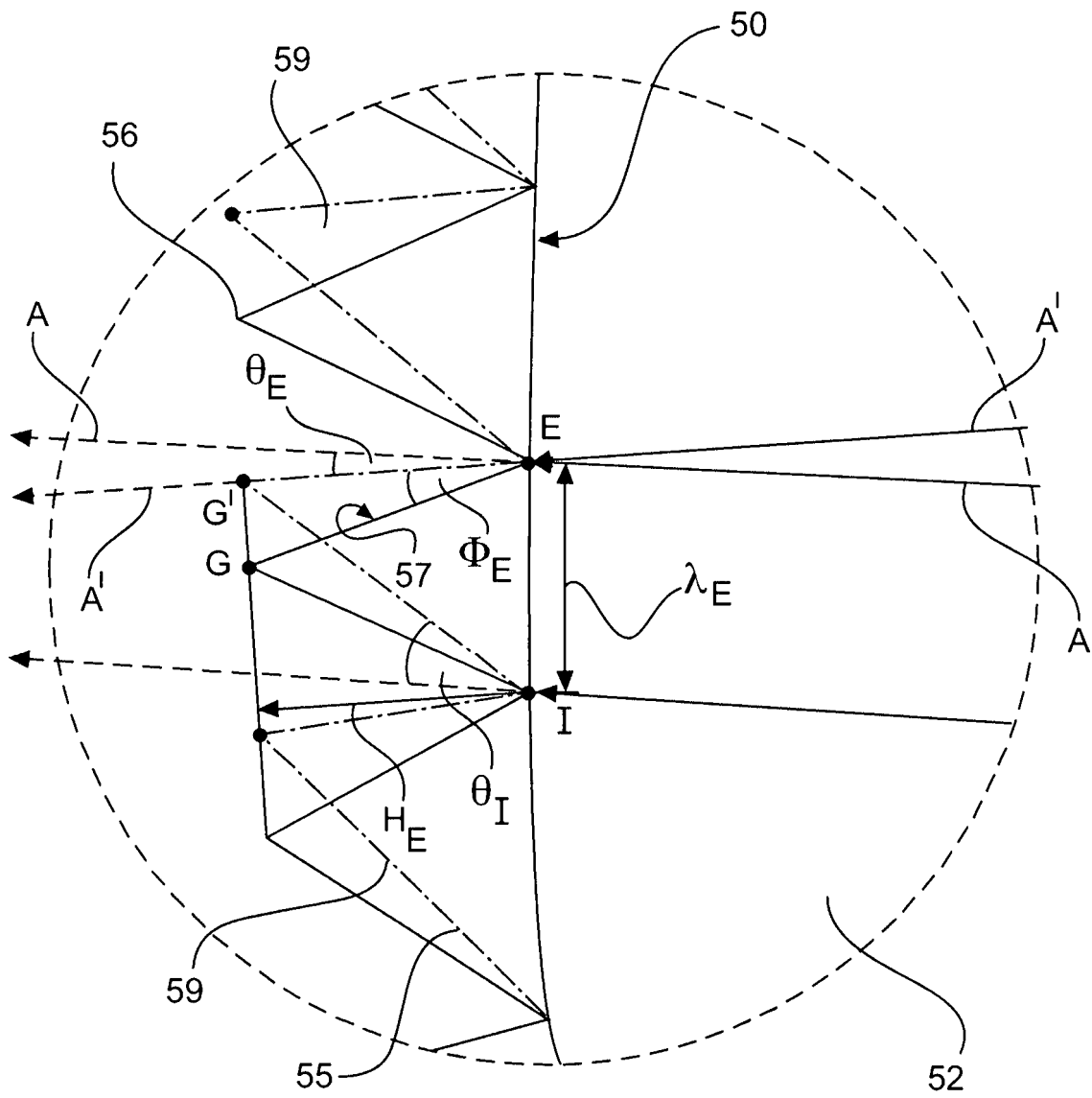


Fig. 7

