



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
20.03.2024 Patentblatt 2024/12

(21) Anmeldenummer: **23196059.2**

(22) Anmeldetag: **07.09.2023**

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
H01Q 1/00 ^(2006.01) **H01Q 3/26** ^(2006.01)
H01Q 3/36 ^(2006.01) **H01Q 21/06** ^(2006.01)
H01Q 1/28 ^(2006.01) **H01Q 3/46** ^(2006.01)
H01Q 25/00 ^(2006.01)

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
H01Q 21/061; H01Q 1/005; H01Q 3/2605;
H01Q 3/267; H01Q 3/36; H01Q 1/288; H01Q 3/46;
H01Q 25/005

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL
NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA
Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

(30) Priorität: **13.09.2022 DE 102022123305**

(71) Anmelder: **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.**
53227 Bonn (DE)

(72) Erfinder:
• **Spietz, Peter**
28211 Bremen (DE)
• **Grundmann, Jan Thimo**
28237 Bremen (DE)

(74) Vertreter: **Heuking Kühn Lüer Wojtek PartGmbB**
Georg-Glock-Straße 4
40474 Düsseldorf (DE)

(54) **RICHTANTENNE MIT VERMESSUNGSSYSTEM ZUR AUTOMATISCHEN PHASENLAGENEINSTELLUNG**

(57) Die Erfindung betrifft eine Richtantenne, insbesondere eine Richtantenne mit einem Vermessungssystem zur automatischen Phasenlageneinstellung. Eine erfindungsgemäße Richtantenne weist eine Mehrzahl von Einzelantennenelementen auf und ist zum Empfang von einem Ziel ausgestrahlter elektromagnetischer Signale und/oder zur Abstrahlung elektromagnetischer Signale zu einem Ziel geeignet, wobei die elektromagnetischen Signale eine Trägerwellenlänge λ und eine Bandbreite B aufweisen, und ist dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Einzelantennenelemente auf einem biegeschlaffen Träger aufgebracht sind, wobei der biegeschlaffe Träger quasi-eben ist, wobei alle Einzelantennenelemente derart auf dem biegeschlaffen Träger aufgebracht sind, dass, sofern der biegeschlaffe Träger im Wesentlichen in Zielrichtung ausgerichtet ist, eine wesentliche Anzahl von Einzelantennenelementen eine freie Abstrahl- beziehungsweise Empfangsrichtung zum beziehungsweise vom Ziel hat, wobei die Richtantenne weiterhin ein Vermessungssystem aufweist, mit dem die Position und/oder Ausrichtung aller Einzelantennenelemente relativ zur Zielrichtung bestimmbar ist, wobei die

Genauigkeit der Positionsbestimmung der Einzelantennenelemente relativ zueinander mindestens genauso oder besser ist als ein vorgegebener Bruchteil $1/n$ der Trägerwellenlänge λ , und wobei die Richtantenne weiterhin eine Phasenlagenbestimmungseinheit aufweist, mit der die in jedem Einzelantennenelement für die Abstrahlung des Sendesignals beziehungsweise die Rekonstruktion des empfangenen Signals erforderliche Phasenlage des Einzelsignals aus den bestimmten Positionen und Ausrichtungen der Einzelantennenelemente und der gewünschten Abstrahlrichtung beziehungsweise Empfangsrichtung bestimmbar ist, und wobei die Richtantenne weiterhin eine Phasenlageneinstellungseinheit aufweist, mit der die zuvor bestimmten erforderlichen Phasenlagen der Einzelsignale der Einzelantennenelemente für den Sende- beziehungsweise Empfangsvorgang jeweils einstellbar sind, und wobei die Richtantenne im Falle einer Empfangsantenne weiterhin eine Vorrichtung aufweist, mit der bezüglich des Empfangsvorgangs aus den empfangenen Einzelsignalen mit der derart eingestellten jeweiligen Phasenlage das empfangene Signal rekonstruierbar ist.

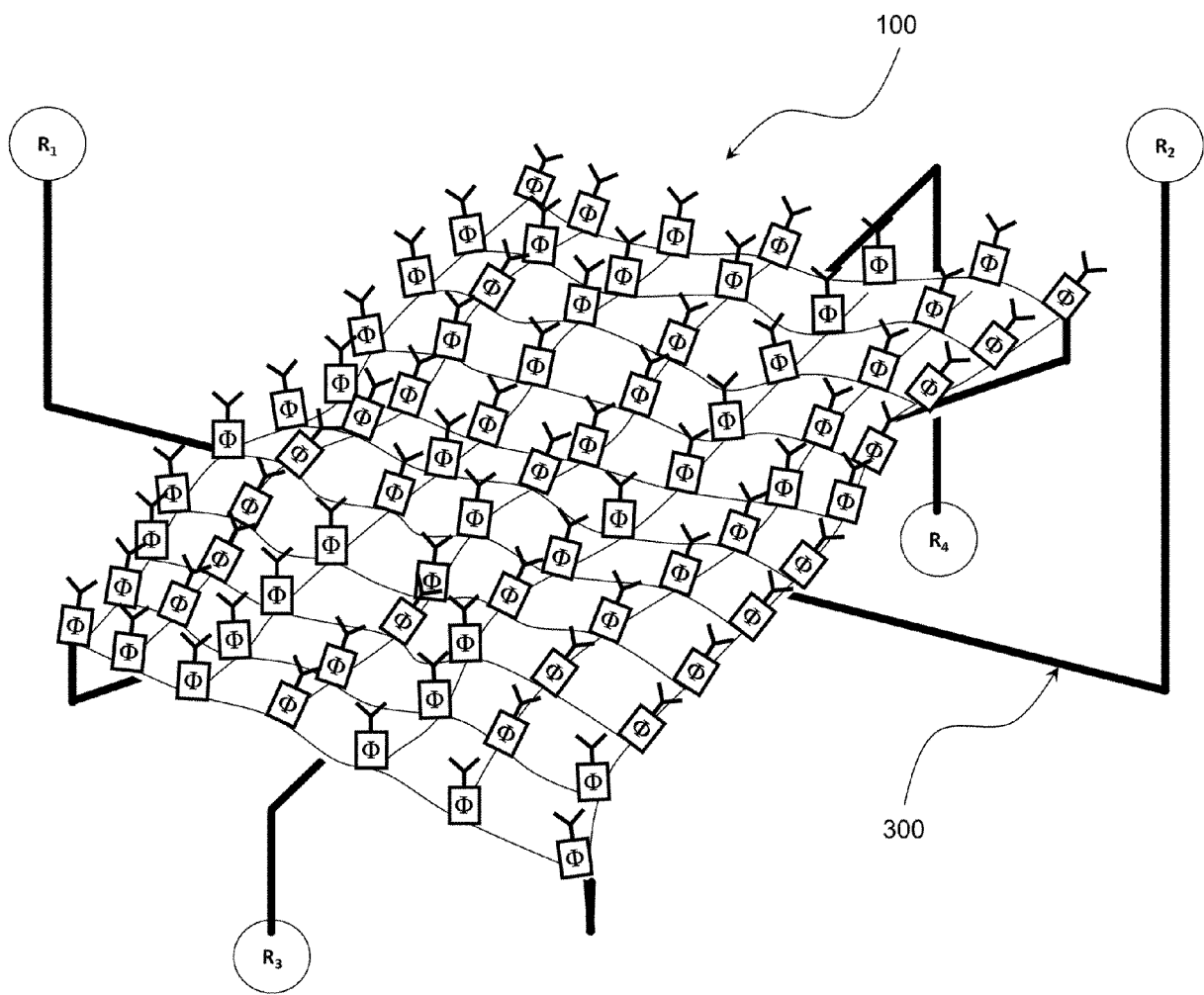


Fig. 1

Beschreibung**TECHNISCHES GEBIET DER ERFINDUNG**

5 **[0001]** Die Erfindung betrifft eine Richtantenne, insbesondere eine Richtantenne mit einem Vermessungssystem zur automatischen Phasenlageneinstellung.

[0002] Antennen dienen der Abstrahlung und/oder dem Empfang elektromagnetischer Wellen. Eine Richtantenne ist eine Antenne, bei der spezielle konstruktive Maßnahmen ergriffen wurden, um eine bauartbedingte Richtwirkung eines einzelnen Strahlers zusätzlich zu verstärken. Eine Richtantenne kann sowohl eine Sendeantenne als auch eine Empfangsantenne sein. Als Sendeantenne konzentriert sie die gesendete Energie in eine gewünschte Richtung und erzeugt dadurch eine Richtstrahlung. Als Empfangsantenne liegt ihre maximale Empfindlichkeit in einer bestimmten Richtung, zum Beispiel zum Aufbau einer Richtfunkverbindung zwischen zwei Punkten. Durch die Richtwirkung wird der Empfang von Störsignalen, deren Quellen außerhalb der Hauptkeule liegen, gedämpft. Zur Beeinflussung der Richtwirkung werden oft mehrere Einzelantennen zu einer übergeordnet wirkenden Gruppenantenne zusammengeführt. Hochgenaue Richtantennen mit hohem Antennengewinn und hoher Richtgenauigkeit erfordern einerseits eine ausreichende Größe als auch eine vom Wellenlängenbereich abhängige hohe geometrische Genauigkeit und zeitliche Formstabilität. Aufgrund der Größe sowie der insbesondere in der Raumfahrt erforderlichen Staubbarkeit und Entfaltbarkeit können diese geometrischen Genauigkeits- und zeitlichen Formstabilitätsanforderungen oft nicht in ausreichendem Maße oder nur unter sehr großem Aufwand realisiert werden.

STAND DER TECHNIK

25 **[0003]** Im Stand der Technik sind einerseits solche Antennen bekannt, die eine fokussierend wirkende geometrische Grundform nach dem Prinzip eines beispielsweise sphärischen oder rotationsparaboloidischen oder rotationsellipsoidischen Spiegels verwenden. Dabei wird die aus der geometrischen Optik bekannte Tatsache benutzt, dass parallel zur Rotationsachse beispielsweise eines Rotationsparaboloids einkommende Strahlen im Fokuspunkt des Paraboloids gebündelt werden. Dort wird dann ein für das gewählte Wellenlängenband geeigneter Empfänger platziert. Wird der Empfänger durch einen Sender ersetzt, so werden die von dort abgestrahlten Signale vom Paraboloid in eine ebene Wellenfront umgewandelt und längs der Rotationsachse des Paraboloids abgestrahlt. Solche geometrisch fokussierenden Antennen sind bekannt sowohl als voll ausgeführte beispielsweise Rotationsparaboloide als auch als sogenannte "Off-Axis"-Paraboloide, in denen nur ein Teil des Rotationsparaboloids realisiert ist, als auch als segmentierte Voll- oder Teil-Paraboloide.

30 **[0004]** Andererseits sind Richtantennen bekannt, die ein anderes physikalisches Prinzip verwenden und die man als phasengesteuerte Gruppenantennen bezeichnen könnte. Diese erreichen eine starke Richtwirkung dadurch, dass sie die Bündelung der Strahlungsenergie durch eine Anordnung und Verschaltung von einer Vielzahl von Einzelstrahlern, im Folgenden als Einzelantennenelemente bezeichnet, realisieren. Deren Einzelsignale werden im Abstrahlvorgang überlagert und bilden durch Interferenz eine für den Anwendungsfall entsprechend geformte, d.h. gerichtete und gebündelte Wellenfront (Überlagerung Huygens'scher Elementarwellen). Dabei kann eine dem Anwendungsfall entsprechend geformte Wellenfront eine ebene Wellenfront sein, was dem "Normalfall" entspricht. Die Wellenfront kann aber auch fokussiert oder gänzlich anders geformt sein. Unterschiedliche Wellenfrontformen können erreicht werden, indem die Einzelsignale der Einzelantennenelemente in geeignet zueinander festgelegter Phasenlage, d.h. geeignet zeitversetzt zueinander gesendet werden. Der erforderliche zeitliche Versatz, das heißt die relative Phasenlage zueinander, hängt von der gewünschten Abstrahlrichtung, der gewünschten Form der Wellenfront und von der Geometrie der Anordnung der Einzelantennenelemente ab. Durch entsprechende Steuerung der Phasenlage der Einzelsignale in den Einzelantennenelementen ist ein Verschwenken des Antennendiagramms der resultierenden Gesamtantenne ohne mechanisches Verschwenken der Antennenanordnung, sondern rein auf elektronischem Wege möglich. Genauso ist das Antennendiagramm auch hinsichtlich seiner Ausdehnung quer zur Abstrahlrichtung formbar. Im Empfangsfall wird sinngemäß umgekehrt verfahren. Die in den Einzelantennenelementen einlaufenden Signale werden jeweils mit einem spezifischen Zeitversatz, d.h. mit einer Phasenlagenkorrektur versehen, die aus der Geometrie der Anordnung, d.h. den Positionen der Einzelantennenelemente, sowie der "Lausrichtung" und der Form der erwarteten einlaufenden Wellenfront resultiert. Die so phasenlagenkorrigierten Einzelsignale werden dann konstruktiv verstärkend überlagert. Diese konstruktiv verstärkende Überlagerung ist dann im Prinzip vergleichbar mit einer Mittelwertbildung über alle Einzelsignale aller Einzelantennenelemente, mit der man das einlaufende Signal "aus dem Rauschen hebt". Das funktioniert aber erst nach der entsprechenden Phasenlagenkorrektur. Diese Technologie mit phasengesteuerten Gruppenantennen ist als Phased-Array-Technologie bekannt. Solche Richtantennen werden nachfolgend als Phased-Array-Antennen bezeichnet.

55 **[0005]** Richtantennen können fest ausgerichtet oder schwenkbar ausgeführt sein. Sie können abhängig von der Größe transportabel oder bedingt transportabel oder ortsfest ausgeführt sein. Da die erreichbare Antennenverstärkung pro-

portional zur Größe der Antenne ist, werden empfindlichere Antennen zunehmend unpraktikabel groß und sind damit in der Regel nur in ortsfester Ausführung möglich.

[0006] Im Stand der Technik sind sowohl für die geometrisch fokussierenden als auch für die Phased-Array-Antennen einfach entfaltbare als auch mehrfach reversibel entfaltbare und wieder einfaltbare Antennen bekannt, die beispielsweise in der Raumfahrt bereits seit längerem erfolgreich eingesetzt werden. Im Falle geometrisch fokussierender Richtantennen realisieren sie die geometrische Form des Antennenkörpers durch eine Vielzahl von Mechanismen und Gelenken, mit denen dann eine elektromagnetisch reflektierende Fläche der gewünschten Geometrie in einer gegebenen Genauigkeit aufgespannt wird. Entfaltbare Anordnungen bestehend aus starren Teilsegmenten von Phased-Arrays sind ebenfalls möglich und wurden bereits realisiert.

[0007] Durch die Antennenanwendung (z.B. Kommunikationsanforderungen, Entfernung, Datenrate oder aber bei Fernerkundung die erforderliche Auflösung) wird definiert, mit welcher "Qualität" eine Antenne arbeiten muss, um den Anforderungen des Anwendungsfalls entsprechend eine zu sendende Wellenfront zu generieren bzw. eine einkommende Wellenfront zu erfassen.

[0008] Die "Qualität" der Antenne drückt sich dabei einerseits in der Größe der Antennenfläche aus, da diese maßgeblich die Empfangsleistung bzw. im Sendefall die Richtcharakteristik bestimmt. Gleichzeitig drückt "Qualität" sich nach Stand der Technik in der Genauigkeit aus, mit der bei einer geometrisch fokussierenden Antenne, z.B. einer Parabolantenne, die geometrische Paraboloidform des Antennenreflektors realisiert ist. Im Fall einer herkömmlichen Phased Array-Antenne drückt sich diese "Qualität" darin aus, wie genau die geometrische Anordnung der Einzelantennenelemente realisiert und bekannt ist. Wichtig und kritisch ist dabei für beide Varianten, dass diese Form- bzw. Anordnungsgenauigkeit über die gesamte Lebensdauer der Antenne und unter allen Einsatz- und Umgebungsbedingungen gewährleistet sein muss. Es sind auch Phased-Array-Antennen bekannt, bei denen die geometrische Anordnung in einer als "Normalfall-Geometrie" vordefinierten Anordnung als bekannt vorausgesetzt wird und versucht wird, kleinräumige, aufgrund mechanisch-technischer Unvermeidbarkeiten auftretende Deformationen durch Korrekturverfahren so gut es geht zu kompensieren. Diese Korrekturverfahren sind an enge strukturelle Voraussetzungen gekoppelt und sind nur begrenzt zielführend (siehe unten).

[0009] Die genannte Form- beziehungsweise Anordnungsgenauigkeit bestimmt, mit welcher Qualität eine abgestrahlte Wellenfront der Anwendung entsprechend geformt und gebündelt und gerichtet ist bzw. mit welcher Qualität eine einkommende empfangene (schwache) Wellenfront konstruktiv überlagernd verstärkt werden kann und damit "lesbar" wird.

[0010] Die Anforderung an die geometrische Form- beziehungsweise Anordnungsgenauigkeit einer Antenne wird oft in Form der " λ/n "-Faustregel formuliert: Dazu wird die erforderliche geometrische Genauigkeit als Bruchteil $1/n$ der zu verwendenden Wellenlänge λ ausgedrückt. Erfordert der Anwendungsfall eine Form- / Anordnungsgenauigkeit von z.B. "allermindestens besser als $1/10$ der verwendeten Wellenlänge λ ", also kurz " $\lambda/10$ ", dann bedeutet das, dass die Summe jeglicher Verformungen durch veränderliche mechanische oder thermomechanische Lasten wie beispielsweise Schwenken relativ zur Schwerkraftrichtung oder Windlast, Temperaturschwankungen, Änderung in der Sonneneinstrahlung (z.B. im Orbit: Übergang in den Erdschatten), Materialalterung, Kriechen, Setzung, usw. an jedem Ort der Antenne über ihre gesamte Lebensdauer kleiner als $1/10$ der verwendeten Wellenlänge λ bleiben muss. $\lambda/10$ ist dabei ein realistischer Wert. Anspruchsvollere Werte wie z.B. $\lambda/20$ und kleiner sind je nach Anwendung jedoch durchaus üblich.

[0011] Die Wellenlängenbereiche können dabei von Meterwellen über die in der Satellitenkommunikation üblichen S-Band und X-Band cm-Wellen bis zum Millimeterbereich rangieren, sind aber abhängig vom Anwendungsfall nicht auf diese Bereiche beschränkt, sondern können darüber hinausgehen. Dementsprechend sind gerade im letztgenannten kurzwelligeren Bereich die Genauigkeitsanforderungen für die Realisierung der Antennen im Sub-Millimeterbereich. Hieran sind astronomische Raumfahrt-Missionen bereits gescheitert.

[0012] Abweichungen von der Idealform eines Reflektors oder einer Phased-Array-Antenne führen dazu, dass sich die von verschiedenen Punkten auf ihnen ausgehenden, für jeden enthaltenen Frequenzanteil sinusförmigen Elementarwellen nicht mehr vollständig additiv überlagern können, da sie sich nicht phasengleich begegnen, folglich auf den Gipfel einer Elementarwelle die steil abfallende Flanke oder gar das Tal einer anderen Elementarwelle trifft, und somit die Mittelwertbildung beider bei zunehmender Phasendifferenz rasch gegen null strebt. Dadurch wird der physikalisch mögliche Antennengewinn nicht mehr erreicht. Weiterhin bedeuten Abweichungen von der Idealform eines Reflektors oder einer Phased-Array-Antenne auch eine Verkippung der Reflektions- bzw. Abstrahlrichtungen der Elementarwellen gegeneinander und von der idealen Richtung weg, sodass das jeweils stärkste Signal den Sammelpunkt verfehlt.

[0013] Beispielsweise ist der Spiegel des Hubble Space Telescope auf 10 nm genau geschliffen, was im Wellenlängenbereich der Bildsensoren von 115 nm bis 1.7 μm einer Qualität der wellenlängenrelativen Formtreue von $\lambda/11,5$ bis $\lambda/170$ entspricht, die es sicher ermöglicht, über diesen gesamten Bereich das volle physikalisch mögliche Auflösungsvermögen, d.h. die Abbe'sche Beugungsbegrenzung bzw. die physikalisch gleichbedeutende Rayleigh'sche Punktquellen-Auflösungsgrenze des Hauptspiegels direkt zu erreichen. Der bekannte Schleif-Fehler, der den Hauptspiegel zwar am Rand 2200 nm, d.h. über den genutzten Wellenlängenbereich 19λ bis $1,3 \lambda$, zu flach machte, aber diese falsche Form dennoch besser als $\lambda/10$ einhielt, konnte daher durch nachträglich im Weltraum eingebaute, optisch präzise entgegengesetzt wirkende Korrekturspiegel vollständig korrigiert werden. Dagegen kann kleinskalige oder lokale Wellig-

keit oder zufällige Rauigkeit, die zufällig lokal oder über die gesamte Spiegeloberfläche verteilt ist, nicht durch eine einfache korrigierende Spiegelform ausgeglichen werden, obwohl sich beide - präzise ausgeführte Schleif-Fehler und ihre zufälligen Abweichungen - physikalisch auf gleiche Weise auswirken. Denkt man sich die reale Form der Spiegeloberfläche in beliebig kleine Flächen aufgeteilt, die der an ihrem Ort und über ihre Ausdehnung gemittelten Oberflächenorientierung perfekt und ideal entsprechen, so wird unmittelbar klar, dass die Reflektionen der auf eine solche verknitterte Spiegel-Mosaikfläche eintreffenden idealen Lichtstrahlen in einer zufälligen Streuung den Brennpunkt zumeist etwas verfehlen. Da jedes gedachte kleine Mosaikteilspiegelchen statt eines vereinfacht makroskopisch ideal gedachten Strahls in der Realität ein Beugungsmuster leuchtender konzentrischer Ringe um einen leuchtenden Punkt, ein sogenanntes Airy-Scheibchen, erzeugt, das den Abbe'schen Beugungsregeln gemäß der Größe des gedachten Mosaikteilspiegelchens ausgebildet ist, kommt es häufig vor, dass der zentrale leuchtende Punkt des Airy-Scheibchens eines Mosaikteilspiegelchens in eine dunkle Zone des Airy-Scheibchens eines anderen Mosaikteilspiegelchens fällt. Dies passiert auf allen räumlichen Skalen der Welligkeit und Rauigkeit und Signal-Wellenlänge vielfach und zugleich. So werden durch die nicht voll konstruktive Überlagerung Kontrast und Schärfe ausgewaschen, wie man es von Bildern kennt, die aufgenommen wurden mit einer durch Fingerabdruck gemusterten oder durch rohes Abreiben in der Hosentasche stumpf gewordenen Mobiltelefonkameraoptik. Es wird - oft unbemerkt - zugleich die empfangene Helligkeit des Bildes reduziert, was dem Einsinken des Nutzsignals ins Hintergrundrauschen entspricht. Im Extremfall kommt es bei einer Verschmierung um $\lambda/2$ oder Vielfache davon zur gegenseitigen Auslöschung von Lichtstrahlen, wodurch bestimmte Bildsignale abgeschwächt (sogenannte Modulationsübertragungsfunktion, welche Phasenverschiebungseffekte vernachlässigt) und sogar örtlich umgekehrt werden können (sogenannte Optische Übertragungsfunktion, die auch die Phasenübertragungsfunktion enthält). Das Verhältnis der realen zur idealen Übertragungsfunktion wird in der Optik als Strehl-Zahl zwischen 0 und 1 bezeichnet und kann über die Ruze-Formel aus der Antennen-Theorie direkt überführt werden zum statistischen Mittelwert der Phasenabweichung, d.h. gleichbedeutend der Formabweichung im Verhältnis zur Wellenlänge, λ/n . J. Ruze, Antenna Tolerance Theory-A Review, Proceedings of the IEEE, vol. 54, No. 4, April 1966, gibt an, dass für einen Leistungsverlust von 1 dB, entsprechend einem Faktor 0,794 für die Signalleistung und 0,891 für die Signalamplitude im Verhältnis zur idealen Signalleistung bzw. Signalamplitude, die Phasenverschiebung $\lambda/14$ (rms) nicht überschreiten darf, und somit die Formtreue eines flachen, d.h. langbrennweitigen Reflektors besser als $\lambda/28$ (rms) sein muss, da bei Reflektion der Fehler-Weg zweimal durchlaufen wird, von der eingehenden, ideal planar gedachten Wellenfront zur abgehenden, gestörten Wellenfront. Der Signalleistungsfaktor entspricht dabei der Strehl-Zahl. Bei $\lambda = 440$ bzw. 633 nm waren für das Hubble Space Telescope Strehlzahlen von 0,80 bzw. 0,90 gefordert, es erreicht üblicherweise $\approx 0,86$ bzw. $\approx 0,95$ und unter optimalen Bedingungen 0,90 bzw. 0,98, d.h. auch für anspruchsvolle Optiken ist der Mindestforderung nach ein Antennenverlustfaktor von höchstens 1 dB akzeptabel, der weiterhin auch in der Größenordnung der Strehl-Zahl für eine gerade eben beugungsbegrenzte ideale Optik von $\approx 0,8$ liegt.

[0014] Wo Deformationen der Antenne nicht nachträglich korrigiert werden können, wie beim Radioastronomiesatelliten "Haruka", wird die geplante Leistung verfehlt, umso stärker je kürzer die Wellenlänge innerhalb der genutzten Wellenlängenbereiche ist. Die Entwicklung dessen geplanter Nachfolge-Mission "Astro-G" musste nach erheblichen Ausgaben abgebrochen werden, da die erforderliche Formtreue der Antenne von weniger als 0,4 mm (rms) nicht erreicht werden konnte. In dessen geplanten Wellenlängenbändern um 8, 22, und 43 GHz, also $\lambda = 37,5$; 13,6 bzw. 7,0 mm Wellenlänge, entspricht die geforderte Formtreue einem λ/n -Wert besser als $\lambda/94$, $\lambda/34$, bzw. $\lambda/17,4$ (rms); also einer wellenlängenrelativen Qualitätsanforderung im selben Bereich wie für den Hubble-Space-Telescope-Hauptspiegel, jedoch für eine filigrane entfaltbare Antennen-Bauweise statt einen hochfesten Glaskeramik-Spiegel.

[0015] Im Zusammenhang mit den genannten Korrekturverfahren bei Phased-Array-Antennen sind sogenannte Conformal-Arrays bekannt, die auf den Außenflächen von z.B. Flugzeugen aufgebracht sind. Die geometrische Form des Phased-Arrays ist in solchen Fällen bestimmt durch die meist aerodynamisch bestimmte Form des Flugzeugteils, auf das das Array der Antennenelemente aufgebracht ist. Dies kann beispielsweise der gewölbte Flugzeugrumpf sein oder die Ober- oder Unterseite einer Tragfläche. In einfachen Fällen kann die Trägerfläche aber auch eben sein.

[0016] Typisch und auch problematisch für solche Anwendungen ist, dass die Oberfläche, die das Phased-Array trägt, im Betriebsfall vibrieren kann oder aber durch Belastung aus ihrer ursprünglichen unbelasteten Lage und Form beispielsweise durch Beulen oder Buckeln abweicht. Dadurch wird die Position der Einzelantennenelemente während der Anwendung räumlich und zeitlich hinsichtlich der erforderlichen Genauigkeit unvorhersagbar verändert. Die Einhaltung einer für den unbelasteten Zustand erfüllten λ/n -Genauigkeit ist im belasteten Fall nicht mehr gegeben, wodurch auch die Qualität der Antennen nicht mehr gegeben ist und Sende- und Empfangsqualität reduziert sind.

[0017] Dasselbe gilt sinngemäß auch für Phased-Array-Antennen, die auf einem dedizierten zum Beispiel ebenen Träger, also nicht conformal, d.h. nicht mehr beispielsweise einer gegebenen Rumpfform folgend, realisiert sind und im Einsatz mechanischen Lasten und Störeinflüssen, beispielsweise Vibrationen, aber auch unregelmäßigen bis quasistatischen Bewegungen, beispielsweise durch Wind, Eis und/oder thermischen Effekte hervorgerufenen Bewegungen, ausgesetzt sind. Dasselbe gilt sinngemäß auch für Phased-Array-Antennen in der Raumfahrt.

[0018] Um die genannten Effekte und die damit verbundene Verschlechterung der Antennenqualität zu korrigieren, sind beispielsweise aus dem US-Patent US 8,184,042 B2 Vorrichtungen bekannt, die auf den Bereich eines Conformal

Arrays eine Anzahl von Kalibrationselementen aufbringen. Diese Kalibrationselemente erlauben es, untereinander per Antenne ("monopole antenna") Kalibrationssignale auszusenden und zu empfangen ("a tone") und die Phasenlage des einkommenden Kalibrationssignals (nicht zu verwechseln mit dem eigentlichen Sende-/Empfangssignal des eigentlichen Antennenbetriebs) zu bestimmen. Die im unbelasteten Zustand gemessenen Phasenlagen werden in einer Phasenkalibrationstabelle zusammengefasst. Im belasteten Zustand im Einsatz wird derselbe Vorgang wiederholt und die Kalibrationselemente bestimmen untereinander wiederum die jeweilige Phasenlage der empfangenen Kalibrationssignale. Aus der Differenz zwischen der Phasenlage im unbelasteten Fall gegenüber der Phasenlage im belasteten Fall wird dann auf eine entsprechende Veränderung des Abstands zwischen den betreffenden Kalibrationselementen geschlossen.

[0019] Aus den zwischen den Kalibrationselementen gegenüber dem unbelasteten Fall nun unter Belastung aufgetretenen Phasenlagendifferenzen $\Delta\varphi_i$ wird auf Abstandsänderung $\Delta d_i = \Delta\varphi_i / 2\pi \cdot \lambda_{\text{kal}}$ geschlossen.

[0020] Dies beinhaltet die stillschweigende, aber kritische Annahme, dass die durch die Deformation oder Schwingung bewirkten Abstandsänderungen kleiner sind als die Wellenlänge λ_{kal} des Kalibrationssignals.

[0021] Basierend auf der Kenntnis der Struktur der Trägergeometrie, beispielsweise des Flugzeugrumpfes, ist es möglich, die Schwingungsmoden der das Antennenarray tragenden Fläche mathematisch zu modellieren, denn man kennt die Form und die Fixpunkte, wo beispielsweise ein Rumpfblech auf eine tragende Struktur genietet ist. An solchen Fixpunkten ist dann ein Schwingungsknoten zu erwarten, während zwischen solchen Fixpunkten Schwingungsbäuche zu erwarten sind. Führt man die aus der Gesamtheit aller Phasenlagendifferenzen abgeleitete Menge der Abstandsänderungen in das mathematische Schwingungsmodenmodell ein, so kann man dieses durch geeignete mathematische Methoden dahingehend lösen, dass man auf eine Veränderung der Geometrie der das Antennenarray tragenden Fläche schließen kann. Die so berechnete Veränderung der Lage der tragenden Fläche wird auf die Lage der Antennenelemente des eigentlichen Phased-Arrays übertragen. Sodann wird für die einzelnen Antennenelemente des Phased-Arrays die dann für den Sende-/Empfangsbetrieb jeweils gültige neue relative Phasenlage für die auszusendenden oder zu empfangenden Nutzsignale berechnet und angewendet.

[0022] In derselben Quelle wird auch auf ältere Methoden verwiesen, die statt Kalibrationselementen und Phasenlagendifferenzmessung eine Anordnung von mechanischen Sensoren verwenden, um auf die Deformation des Conformal Arrays zu schließen und über ein Schwingungsmodenmodell dann korrigierte Positionen und korrigierte Phasenlagenkorrekturen im Phased-Array abzuleiten.

[0023] In derselben Quelle wird auch eine weitere ältere Methode genannt, bei der eine begrenzte Zahl von Kalibrationsempfängern außerhalb des eigentlichen Conformal Arrays montiert wird und aus den dort im Sendefall empfangenen Signalen auf Deformationen im Conformal Array rückgeschlossen wird.

[0024] Auch für Phased-Array-Antennen auf dediziertem Träger, also nicht conformal, werden ähnliche Ansätze diskutiert. In der Publikation Lesueur et al. (2009) "Optical sensor for the management of Radar antenna distortion" werden optische Methoden untersucht, mit denen Verformungen einer nicht ideal steifen Radarantenne gegenüber der Normallage vermessen werden. Diese Normallage entspricht der unbelasteten Geometrie des Conformal Arrays. Die gemessenen Deformationen werden dann in der Phasenlagenkorrektur berücksichtigt. Dabei werden über die optische Methode also Abweichungen aus einer Normallage quantifiziert.

[0025] In de Wit et al. (2007): "Concept for measuring and compensating array deformation" wird ein Vermessungssystem für nicht ideal steife Trägerstrukturen bei Phased-Array-Antennen untersucht. Hierbei wird auf Beschleunigungssensoren und die Methode der Inertialvermessung ("IMU") gesetzt, die aus gemessenen Beschleunigungen über zweifache Integration dann Positionsänderungen ableiten.

[0026] In Yang Bo, Liu Ning, Zhang Zhaolin, Chang Cuiyan (2015): Self-calibration of Spaceborne Membrane Phased Array, SPACOMM 2015 The Seventh International Conference on Advances in Satellite and Space Communications, Barcelona, Spain wird über ein Phased Array auf einer Membran und eine Selbstkalibrationsmethode berichtet, welche unter Verwendung der selben Antennenelemente für Senden und Empfang und die Nutzung eines zufällig verteilt rückstreuenden Zieles wie einer Ozeanoberflächen oder Regenwald eine Selbstkalibration erlauben soll. Die Bestimmung von deformationsbedingten Phasenunterschieden für eine nachfolgende Phasenkorrektur bzw. -einstellung basiert auf der Annahme, dass ein von einem derartigen Ziel rückgestreutes Signal beim Wiederauftreffen auf das Array als ausreichend ebene Wellenfront "kohärent" angesehen werden kann, um Phasenlagenunterschiede aufgrund von Deformation schätzen zu können.

[0027] Im US-Patent US 6,333,712 B1 wird über einen ähnlichen Ansatz berichtet, der über Dehnmessstreifen die Deformation der Antennenstruktur misst. Die Dehnmessstreifen sind an solchen Stellen platziert, für die aufgrund vorangegangener strukturelle mechanischer Analyse große und damit leichter messbare und aussagekräftige Deformationen erwartet werden. Über ein physikalisch-mathematisches Modell werden dann Deformationen abgeleitet und daraus Phasenlagenkorrekturen bestimmt, die eine vorliegende Deformation korrigieren.

[0028] Im US-Patent 6,954,173 B2 wird ein ähnlicher Ansatz berichtet, der eine "kohärente Strahlungsquelle", also einen Sender nutzt, der gegenüber dem Phased-Array platziert ist. Dieser externe Kalibrationssender sendet in demselben Wellenlängenbereich, in dem die Phased-Array-Antenne auch arbeitet. Es wird eine Methode beschrieben, wie

mit dem Kalibrationssignal Phasenlagenunterschiede in den Einzelantennenelementen bestimmt werden, die durch Deformationen des Phased-Arrays verursacht sind. Daraus wird auf die aktuellen Positionen der Einzelantennenelemente des Phased-Arrays geschlossen und daraus werden Phasenlagenkorrekturen abgeleitet, um damit eine vorliegende Deformation zu korrigieren.

[0029] Im US-Patent US 6,703,970 B2 wird über eine für Weltraumanwendung geeignete und in Form mehrerer steifer Paneele entfaltbare Phased-Array-Antenne berichtet, die dasselbe Problem behandelt: Zunächst erfolgt die Bestimmung der Deformation der Anzahl von Paneelen, die die Phased-Array-Antennenelemente tragen gegenüber einer "expected predetermined configuration", also einer Normalfall-Geometrie. Daraus werden dann über einen "Beam Forming"-Algorithmus bzw. ein Beam-Forming-Netzwerk die Phasenlagenkorrekturen bestimmt.

[0030] Bei großen Antennen und Parabolspiegeln, die zum Beispiel auf der Erde in Betrieb sind, werden ähnliche Ansätze verwendet, um Deformation der Antennen oder Spiegel zu berücksichtigen. Es werden mathematische Modelle aufgestellt, die das Deformationsverhalten der Antennen oder Spiegel, beispielsweise Deformationen unter Erdschwere, wenn die Zielrichtung durch Verschwenken verändert wird, oder Deformationen, wenn die Temperatur sich ändert oder eine Windlast auftritt, beschreiben. Diese Modelle werden entweder empirisch kalibriert oder aber sie verwenden analytische physikalisch-mathematische Vorausberechnungen. Der nächste Schritt im Verfahren weicht dann aber von den bis hierher beschriebenen Verfahren ab: Die Ergebnisse der physikalisch-mathematischen Modelle werden dann nicht zur Phasenlagenkorrektur von Signalen verwendet, sondern die Antennenform bzw. Spiegelform wird durch mechanische Aktuatoren aktiv korrigiert. Deshalb wird dieser Ansatz als "Aktive Optik" bezeichnet. Es gibt hier auch regelkreisbasierte Lösungen, bei denen ein Justagesender beispielsweise an einem Ort auf der Rotationsachse, also im Blickfeld der Antenne, aber außerhalb der einfachen Brennweite des Paraboloids bzw. einer anderen geeignet gewählten Geometrie untergebracht ist. Abhängig von der Geometrie der Antenne werden die von diesem Justagesender abgestrahlten Signale an einem anderen Ort entlang der Rotationsachse der Antenne wieder gebündelt. Ein Justageempfänger, der an diesem Ort untergebracht wird, registriert die abgestrahlten Justagesignale. Bei Implementierung eines geeigneten Regelkreises kann die Geometrie der Antenne unter Zugrundelegung entsprechend angepasster analytischer Modelle ähnlich derer, wie sie auch für die nicht-regelkreisbasierte Lösung verwendet werden, nun auch durch aktive Maximierung des Justagesignals korrigiert werden. Bei bildgebenden Systemen, i.d.R. optischen Teleskopen, Radioteleskopen und bildgebenden RADAR-Anwendungen, werden durch die aktive Optik die Abbildungseigenschaften verbessert. Bei nicht-bildgebenden Systemen wird die durch die Antennenqualität gegebene Antennenverstärkung durch die aktive Optik optimiert.

[0031] Bei großen Antennen und Teleskopen gibt es eine weitere Methode, die prinzipiell ähnliche Ansätze nutzt, wobei aber nicht Deformationen der Antennen oder des Teleskops oder des Phased-Arrays korrigiert werden, sondern Störeffekte, die durch die Atmosphäre, beispielsweise Luftflimmern, verursacht sind. Diese Methode der "Adaptiven Optik" korrigiert nicht Abweichungen der Antenne von der idealen Antennenengeometrie (interne Effekte), sondern Verzerrungen in der einkommenden Wellenfront, die durch externe, atmosphärische Effekte, beispielsweise Luftflimmern verursacht sind. Sie verwendet das Signal von ausreichend lichtstarken Sternen, die im Empfangssignal in der Nachbarschaft des zu beobachtenden Objektes enthalten sind, um die von der Atmosphäre verzerrten Wellenfronten zu korrigieren. Beim Fehlen geeignet lichtstarker Objekte zur Korrektur können auch mit Lasern künstliche sogenannte Laserleitsterne in der Atmosphäre erzeugt werden, die die Korrektur ermöglichen. In beiden Fällen wird als Messgröße die relative Phasenverschiebung benachbarter Feldpunkte der einlaufenden Wellenfront genutzt, wobei keine Information über die Form oder Verformung der optischen Elemente erfasst wird.

[0032] Aktive Optik und Adaptive Optik können kombiniert angewandt werden, was bei modernen optischen Großteleskopen üblich ist.

NACHTEILE DES STANDS DER TECHNIK

[0033] Der zentrale Nachteil einfach entfaltbarer als auch mehrfach reversibel entfaltbarer und wieder einfaltbarer Antennen nach Stand der Technik liegt darin, dass sie hochkomplexe Mechanismen mit einer Vielzahl von Gelenken und formenden Strukturbauteilen in hoher Fertigungsgenauigkeit erfordern, um zu ermöglichen, eine geeignete Antennenfläche in ausreichender Größe und in der erforderlichen ausreichenden Genauigkeit aufzuspannen. Dies macht sie in der Herstellung aufwändig, teuer und aufgrund ihrer hohen Komplexität fehleranfällig. Darüber hinaus sind sie hinsichtlich der entfaltbaren Größe eingeschränkt durch Fertigungstoleranzen sowie beispielsweise thermo-mechanische Effekte, die unter wechselnder Sonneneinstrahlung zu technisch kaum vermeidbaren Deformationen führen. Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass aufgrund wechselnder Lasten, zum Beispiel aufgrund wechselnder Sonneneinstrahlung sowie durch Degradation von Materialien, die Formstabilität langfristig abnehmen wird. Dies führt im Laufe des Einsatzes zu Abweichungen von der erforderlichen Idealform, was letztlich dazu führt, dass die Antenne unbrauchbar wird oder nur noch mit minderer Qualität senden und empfangen kann. Insbesondere durch die auf den verwendeten Trägerraketen maximal verfügbaren Stau Maße sind solche entfaltbaren Antennen durch das Zusammenspiel von Größe, gewünschter genauer Geometrie und hochgenauen komplexen Mechanismen zur Entfaltbarkeit hinsichtlich der maximal

realisierbaren Größe kritisch begrenzt. Sinngemäß gilt dasselbe auch für (zum Beispiel durch Segmentierung) entfaltbare Phased-Array-Antennen.

[0034] Der zentrale Nachteil der für Phased-Array-Antennen genannten Korrekturverfahren liegt bezüglich der Conformal Arrays in der oben bereits benannten Annahme, dass die durch Deformation verursachten Abstandsänderungen kleiner sind als die zur Korrektur verwendete Wellenlänge, also in der Annahme, dass der Ansatz $\Delta d_i = \Delta \varphi_i / 2\pi \cdot \lambda_{\text{kal}}$ richtig ist. In der durch Deformation verursachten Abstandsänderung Δd_i ; möglicherweise enthaltene ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge (also $\Delta d_i = (n + \Delta \varphi_i / 2\pi) \cdot \lambda_{\text{kal}}$ mit $n > 0$) werden mit diesem Ansatz nicht erfasst und sind, da der Ansatz nur Phasenlagenunterschiede $\Delta \varphi_i$ misst, mit diesem Ansatz auch prinzipiell gar nicht messtechnisch erfassbar. In diesem Fall werden falsche Eingangsdaten in das Korrekturverfahren eingeführt und die abgeleiteten Lagekorrekturen sowie die daraus im Phased-Array angebrachten Phasenlagenkorrekturen sind falsch. Das abgestrahlte oder empfangene Signal ist in seiner Qualität reduziert. Das Korrekturverfahren ist demnach auf Anwendungen beschränkt, bei denen die Deformationen kleiner sind als die Wellenlänge des verwendeten Kalibrationssignals. Bei wenig biegesteifen bis beispielsweise auch biegeschlaffen Trägern versagt der Absatz.

[0035] Weiterhin setzt das Korrekturverfahren voraus, dass das Phased-Array auf einer Fläche aufgebracht ist, für die ein Schwingungsmodenmodell erstellt werden kann. In Anwendungsfällen, in denen keine modellierbare Struktur vorhanden ist, wie beispielsweise im Falle biegeschlaffer Phased-Array-Antennen, versagt der Ansatz. Darüber hinaus ist das Verfahren nur so gut wie das Schwingungsmodenmodell. Im Rahmen der Schwingungsmodenmodellierung vorhandene Approximationen führen zu entsprechender Verschlechterung der daraus abgeleiteten Positionsänderungen und den daraus ihrerseits abgeleiteten Phasenlagenkorrekturen im Antennenarray und damit zur Verschlechterung der Qualität des Phased-Arrays. Andere Verfahren setzen eine Kalibration im unbelasteten Fall voraus. Damit ist das Verfahren an eine Geometrie gebunden, die durch den unbelasteten Fall gegeben ist und gegenüber der nur wenig abgewichen werden darf. Anwendungen, in denen die Geometrie im Anwendungsfall nicht vorhersagbar ist, können hiermit nicht umgesetzt werden. Damit sind solche Verfahren ungeeignet für Phased-Array-Anordnungen auf biegeschlaffen mehr oder weniger gut aufgespannten Trägern.

[0036] Die optischen Vermessungsverfahren nach Lesueur können nur Abweichungen bestimmen, die bestimmte Grenzen, die durch die Konstruktion an sich vorgegeben sind, nicht überschreiten und die im wesentlichen parallele Ebenen ober- und unterhalb der Normalfall-Geometrie abdecken, d.h. es werden im Wesentlichen nur Auslenkungen in Richtung der Flächennormalen des Antennenträgers erfasst. Es ist ebenfalls ungeeignet für biegeschlaffe Träger.

[0037] Das Verfahren mit Beschleunigungssensoren nach de Wit et al. ist auf periodische Störungen durch Schwingungen mit vergleichsweise gut messbaren Beschleunigungen ausgerichtet und misst nur Auslenkungen in Richtung der Flächennormalen des Antennenträgers. Langsame Driftprozesse, wie sie typischerweise bei einer biegeschlaffen, maßvoll aufgespannten Trägerfolie auftreten, werden nur bedingt erfasst, da sie deutlich kleiner sind und durch die für solche Trägheitsnavigationssysteme typischen langsamen Fehlerdriften überlagert und damit nicht messbar werden. Eine Anwendung auf einem biegeschlaffen Träger wird daher keine ausreichend genauen Korrekturen ermöglichen.

[0038] Das Selbstkalibrationsverfahren nach Yang Bo et al. setzt stillschweigend voraus, dass zwischen der Selbstkalibration, die durch Anzielen und Bestrahlen eines geeigneten Kalibrationszieles erfolgt, und der eigentlichen, dann korrigierten Nutzung kein Verschwenken stattfindet. Denn ein Verschwenken würde beim biegeschlaffen Träger zu einer neuen Deformation führen, die dann wiederum neu kalibriert werden müsste. Genauso muss sichergestellt sein, dass die Zeit zwischen Kalibration und Anwendung der Antenne so klein ist, dass eine durch zwischenzeitliche Drift verursachte Verschlechterung der Kalibration die Leistungsfähigkeit der Antenne nicht unzulässig einschränkt. Außerdem muss die noch unkalibrierte und daher vermindert leistungsfähige Antenne das Kalibrationsziel überhaupt erfassen können, während ihre Leistung noch nicht optimal ist. Dies bedingt eine bereits recht starre, stabile und bekannte Ausgangsform nahe einer Normalform.

[0039] Auch das Korrekturverfahren der aktiven Optik setzt voraus, dass die verwendeten Antennen beziehungsweise Spiegel durch geeignete physikalisch-mathematische Modelle beschrieben werden können. In Anwendungsfällen, in denen keine modellierbare Struktur vorhanden ist, wie beispielsweise im Falle biegeschlaffer Antennen, versagt der Ansatz. Das Verfahren ist nur so gut, wie das zugrunde gelegte physikalisch-mathematische Modell. Das Verfahren kann dementsprechend nur Korrekturen an der Antennenform anbringen, die durch Effekte verursacht sind, die im Rahmen des zugrunde gelegten Modells erfasst und abgedeckt sind.

[0040] Die regelkreisbasierte Variante, die Justagesender und Justageempfänger verwendet, hat darüber hinaus den Nachteil, dass diese Justageelemente als abschattende Elemente im Strahlengang erforderlich sind oder aber nur außerhalb des eigentlichen Betriebs zur Kalibration verwendet werden können, d.h. nicht für Echtzeitanwendungen geeignet sind. Das Verfahren regelt die Form der Antenne nach, wozu eine Vielzahl von mechanisch-elektrischen Aktuatoren erforderlich ist, was die Anordnung technisch komplex macht. Für eine entfaltbare Antenne in der Raumfahrt wäre die Ausstattung mit einer solchen Aktuatorik aufgrund der Komplexität extrem herausfordernd und aufwändig sowie risiko- und kostentreibend. Darüber hinaus sind die Bereiche, innerhalb derer die Geometrie einer Antenne durch mechanische Aktuatoren korrigiert werden kann, ist in der Regel begrenzt.

[0041] Im Gegensatz zu den bisher geschilderten Verfahren weist das Korrekturverfahren der adaptiven Optik eine

andere Zielrichtung auf, da es externe Effekte wie Luftflimmern korrigiert. Es basiert auf der Messung der relativen Phasenlage verschiedener Punkte derselben eingehenden Wellenfront. Als Phasenlagenvergleichsverfahren kann es Abweichungen in ganzzahligen Vielfachen einer vollen Phasenperiode nicht erfassen. Daher ist es anfällig für Messfehler, die aus einer Verschiebung um mehr als eine Wellenlänge resultieren. Außerdem kontrolliert und korrigiert es weder

direkt noch durch eine Modellierung die tatsächliche Form der optischen Elemente beziehungsweise der Antenne. **[0042]** Damit sind mit allen aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren große Richtantennen von hoher Qualität nur mit sehr hohem mechanisch-konstruktivem Aufwand, hoher Komplexität und damit entsprechend hohem Ausfallrisiko herstellbar. Mechanisch-konstruktiver Aufwand und Komplexität treiben einerseits die Kosten in die Höhe und begrenzen andererseits die realisierbare Größe, insbesondere auch in Raumfahrtanwendungen. Bekannte Korrekturverfahren sind hinsichtlich ihrer Wirkweise auf Korrektur kleiner und an strukturellmechanisch spezielle Vorbedingungen geknüpfte Effekte beschränkt und helfen in dieser Situation nicht.

AUFGABE DER ERFINDUNG

[0043] Aufgabe der Erfindung ist es, eine Richtantenne bereitzustellen, die die Nachteile des Stands der Technik zumindest teilweise minimiert. Dazu kann die Richtantenne in der Lage sein, mit hoher Qualität abstrahlende Signale einer jeweiligen Anwendung entsprechend geformt gebündelt und in gegebener Senderichtung gerichtet zu erzeugen und/oder mit hoher Qualität eine aus einer gegebenen Lausrichtung, im Folgenden als Empfangsrichtung bezeichnet, einkommende zu empfangende, gegebenenfalls auch schwache sowie dem Anwendungsfall entsprechende Signale rekonstruierbar zu machen. Diese Richtantenne soll ohne schwer realisierbare aufwändige mechanisch-konstruktive Vorrichtungen der genannten hohen Genauigkeit und zeitlich hochgenauen Formstabilität auskommen, wodurch insbesondere entfaltbare Richtantennen beispielsweise für Raumfahrtanwendungen angegeben werden sollen, die weniger Masse, weniger risikobehaftete Komplexität bei gleichzeitig längerer Lebensdauer aufweisen und größer sein können als dies aus dem Stand der Technik möglich ist oder aber bei vergleichbarer Größe höhere Antennenqualität aufweisen. Konkret soll es erlaubt sein, dass die geometrische Form der Antenne in weiten Grenzen beliebig und weitgehend nichtvordefiniert sein kann und dass diese sich auch - langsam im Verhältnis zur Ausbreitungsgeschwindigkeit der Sendesignale (Lichtgeschwindigkeit) - mit der Zeit verändern darf, wobei die geometrische Form der Antenne nicht nachgeregelt werden muss und die Antenne daher ohne mechanische Aktuatoren mit entsprechender Qualität betreibbar ist.

[0044] Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht in der Angabe eines Richtantennensystems mit einer Mehrzahl erfindungsgemäßer Richtantennen, die im Sinne einer übergeordneten, großen Richtantenne zusammenwirken.

[0045] Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht in der Angabe eines Verfahrens zum Betreiben einer solchen Richtantenne und/oder eines solchen Richtantennensystems.

LÖSUNG DER AUFGABE

[0046] Erfindungsgemäß wird die erste Aufgabe durch eine Richtantenne mit den Merkmalen des unabhängigen Anspruches 1 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen der Richtantenne ergeben sich aus den Unteransprüchen 2 bis 10.

[0047] Die weitere Aufgabe der Erfindung wird durch ein Richtantennensystem gemäß Anspruch 11 gelöst.

[0048] Die letzte Aufgabe der Erfindung wird durch ein Verfahren gemäß Anspruch 12 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildung des Verfahrens ergeben sich aus den Unteransprüchen 13 bis 16.

[0049] Eine erfindungsgemäße Richtantenne weist eine Mehrzahl von Einzelantennenelementen auf und ist zum Empfang von einem Ziel ausgestrahlter elektromagnetischer Signale und/oder zur Abstrahlung elektromagnetischer Signale zu einem Ziel geeignet, wobei die elektromagnetischen Signale eine Trägerwellenlänge λ und eine Bandbreite B aufweisen, und ist dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Einzelantennenelemente auf einem biegeschlaffen Träger aufgebracht sind, wobei der biegeschlaffe Träger quasi-eben ist, wobei alle Einzelantennenelemente derart auf dem biegeschlaffen Träger aufgebracht sind, dass, sofern der biegeschlaffe Träger im Wesentlichen in Zielrichtung ausgerichtet ist, eine wesentliche Anzahl von Einzelantennenelementen eine freie Abstrahl- beziehungsweise Empfangsrichtung zum beziehungsweise vom Ziel hat, wobei die Richtantenne weiterhin ein Vermessungssystem aufweist, mit dem die Position und/oder Ausrichtung aller Einzelantennenelemente relativ zur Zielrichtung bestimmbar ist, wobei die Genauigkeit der Positionsbestimmung der Einzelantennenelemente relativ zueinander mindestens genauso oder besser ist als ein vorgegebener Bruchteil $1/n$ der Trägerwellenlänge λ , und wobei die Richtantenne weiterhin eine Phasenlagenbestimmungseinheit aufweist, mit der die in jedem Einzelantennenelement für die Abstrahlung des Sendesignals beziehungsweise die Rekonstruktion des empfangenen Signals erforderliche Phasenlage des Einzelsignals aus den bestimmten Positionen und Ausrichtungen der Einzelantennenelemente und der gewünschten Abstrahlrichtung beziehungsweise Empfangsrichtung bestimmbar ist, und wobei die Richtantenne weiterhin eine Phasenlageneinstellungseinheit aufweist, mit der die zuvor bestimmten erforderlichen Phasenlagen der Einzelsignale der Einzelantennenelemente für den Sende- beziehungsweise Empfangsvorgang jeweils einstellbar sind, und wobei die Richtantenne im Falle einer Empfangsantenne weiterhin eine Vorrichtung aufweist, mit der bezüglich des Empfangsvorgangs aus den

empfangenen Einzelsignalen mit der derart eingestellten jeweiligen Phasenlage das empfangene Signal rekonstruierbar ist.

[0050] Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass zur Realisierung von mechanisch-konstruktiv einfach ausgeführten und damit leichter herstellbaren großen Richtantennen mit gleichzeitig hoher Antennenqualität ein Blickwechsel, ein Paradigmenwechsel erforderlich ist.

[0051] Die vorliegende Erfindung formuliert einen solchen Paradigmenwechsel, der einen signifikanten Qualitätssprung ermöglicht hin zu leichter realisierbaren größeren und insbesondere größeren entfaltbaren Antennen bei gleichzeitig gegebener oder sogar besserer Antennenqualität als im Stand der Technik und benennt die erforderliche Technologie.

[0052] Die Erfindung verlagert die für qualitativ hochwertige Richtantennen nach Stand der Technik hohen Genauigkeitsanforderungen an die mechanisch-geometrische Form der Antenne und deren zeitliche Formstabilität weg von diesen konstruktiv-geometrischen und mechanisch nur schwer realisierbaren Anforderungen hin zu einem entsprechend genauen, aber leichter realisierbaren Vermessungssystem und Phasenlageneinstellungssystem, das die jeweils vorhandene aktuelle Geometrie der durch einen biegeschlaffen, weitgehend beliebig driftenden Träger realisierten Richtantenne zeitgerecht erfasst und diese aktuelle Geometrie dann über Phasenlageneinstellung im Sende- beziehungsweise Empfangsbetrieb berücksichtigt.

[0053] Damit unterscheidet sich die erfindungsgemäße Richtantenne hinsichtlich des Wirkprinzips grundsätzlich von den bisher bekannten Methoden, die vom Charakter her entweder keine Korrektur beinhalten und auf hochgenaue und formstabile Geometrie angewiesen sind oder aber Korrekturmethode sind, dahingehend, dass diese Korrekturmethode grundsätzlich eine bekannte Normalfall-Geometrie voraussetzen als auch grundsätzlich strukturell-mechanische Modellierbarkeit (Schwingungsmodenmodelle) des Trägers erfordern als auch grundsätzlich nur kleine Abweichungen (kleiner als die Wellenlänge der verwendeten Kalibrationssignale) erlauben.

[0054] Im Unterschied zu herkömmlichen Richtantennen, ob mit oder ohne Korrekturverfahren, muss bei der erfindungsgemäßen Richtantenne nicht vorausgesetzt werden, dass die Antenne eine hochgenau bekannte Geometrie hat. Genauso muss nicht vorausgesetzt werden, dass diese Antenne trotz Störeinflüssen diese hochgenaue Geometrie dann über die Zeit auch langfristig stabil formtreu halten kann. Stattdessen ist bei der erfindungsgemäßen Richtantenne erlaubt, dass die Geometrie grundsätzlich unbekannt und sogar veränderlich sein darf, da die Geometrie direkt vor dem Sende-/Empfangseinsatz jeweils aktuell durch Vermessung bestimmt wird. Die Nutzung von in gewissen Grenzen beliebig zeitveränderlichen biegeschlaffen Trägern der Antennenelemente der Richtantenne, was auch eine Lagerung auf Flüssigkeitsoberflächen oder in einer Atmosphäre aufgehängte biegeschlaffe Anordnungen umfassen kann, wird durch die Erfindung ermöglicht.

[0055] Das Vermessungssystem ist in der Lage, innerhalb eines unkritisch großen zulässigen Driftvolumens die Position der Einzelantennenelemente relativ zueinander zu bestimmen, die Ausrichtung dieser Anordnung von Einzelantennenelementen relativ zur Sendebeziehungsweise Empfangsrichtung zu bestimmen und/oder auch die Ausrichtung aller Einzelantennenelemente relativ zur Sende- beziehungsweise Empfangsrichtung zu bestimmen. Dabei ist die Genauigkeit der Positionsbestimmung der Einzelantennenelemente relativ zueinander mindestens genauso oder besser als ein aus dem Anwendungsfall vorgegebener Bruchteil $1/n$ der Wellenlänge λ .

[0056] Die erfindungsgemäße Richtantenne weist weiterhin eine Phasenlagenbestimmungseinheit auf, mit der aus den so bestimmten Positionen und ggfs. Ausrichtungen der Einzelantennenelemente und der Sende- beziehungsweise Empfangsrichtung die Phasenlagen der Einzelsignale in den Einzelantennenelementen bestimmbar sind, beispielsweise für die kohärente und ohne Phasenverschiebung zueinander stattfindende konstruktiv interferierende Abstrahlung des Sendesignals beziehungsweise für die kohärente konstruktiv interferierende Rekonstruktion des empfangenen Signals aus den in jedem Einzelantennenelement empfangenen Einzelsignalen.

[0057] Darüber hinaus weist die erfindungsgemäße Richtantenne weiterhin eine Vorrichtung auf, mit der im Empfangsfall aus den so hinsichtlich der Phasenlage eingestellten Einzelsignalen das empfangene Signal rekonstruiert werden kann. Diese Rekonstruktion kann beispielsweise durch kohärente, konstruktiv interferierende Überlagerung analog oder digital erfolgen.

[0058] Die oben genannte Genauigkeitsanforderung im Sinne der λ/n -Genauigkeit gilt dabei nur bezüglich der relativen Positionen der Einzelantennenelemente untereinander, das heißt, relativ zueinander, denn diese bestimmt die für kohärente und konstruktiv interferierende Abstrahlung bzw. kohärente konstruktiv interferierende Rekonstruktion des empfangenen Signals erforderliche einzustellende relative Phasenlage der Einzelsignale. Die Wirksamkeit der Vorrichtung wird durch die Tatsache, dass die Positionen der Einzelantennenelemente in einem weit gefassten zulässigen Driftvolumen verschoben sein können, nicht beeinträchtigt.

[0059] Aufgrund dieser Eigenschaft ist es möglich, mit der erfindungsgemäßen Richtantenne insbesondere auch sehr breitbandige, das heißt sehr stark modulierte, beispielsweise auch sehr stark frequenz- oder/und phasenmodulierte Signale in gleichmäßig hoher und von der Modulationstiefe unabhängiger Qualitätstreue auszusenden, da durch die Positionsbestimmung der einzelnen Antennenelemente in einer λ/n -Genauigkeit das Auftreten von unbeabsichtigten oder unbemerkten Phasenverschiebungen zwischen einzelnen Einzelantennenelementen um ganzzahlige Vielfache

der Wellenlänge λ prinzipiell ausgeschlossen ist. Dadurch ist eine vollständig phasentreue konstruktive Überlagerung der ausgesandten oder empfangenen Signale möglich, und diese phasentreue konstruktive Überlagerung bleibt auch bei großen, ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge als Phasenlagenunterschied verursachenden elektronischen Schwenkwinkeln der Antennenkeule erhalten.

[0060] Begrifflich sei folgendes erläutert: Zunächst sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass im Rahmen der hier vorliegenden Patentanmeldung unbestimmte Artikel und Zahlenangaben wie "ein", "zwei" usw. im Regelfall als "mindestens"-Angaben zu verstehen sein sollen, also als "mindestens ein...", "mindestens zwei..." usw., sofern sich nicht aus dem jeweiligen Kontext ausdrücklich ergibt oder es für den Fachmann offensichtlich oder technisch zwingend ist, dass dort nur "genau ein...", "genau zwei..." usw. gemeint sein können. Weiterhin sind alle Zahlenangaben sowie Angaben zu Verfahrensparametern und/oder Vorrichtungsparametern im technischen Sinne zu verstehen, d.h. als mit den üblichen Toleranzen versehen zu verstehen. Auch aus der expliziten Angabe der Einschränkung "wenigstens" oder "mindestens" o.ä. darf nicht geschlossen werden, dass bei der einfachen Verwendung von "ein", also ohne die Angabe von "wenigstens" o.ä., ein "genau ein" gemeint ist.

[0061] Unter dem hier verwendeten Begriff des **"zulässigen Driftvolumens"** ist der geometrische Raum zu verstehen, innerhalb dessen sich der biegeschlaife Träger aufgrund von Drift bewegen darf, derart dass innerhalb dieses Raumes die Position aller zur wirksamen projizierten Fläche beitragenden Einzelantennenelemente mit einer Genauigkeit vermessen werden kann, die der aus der Anwendung resultierenden λ/n -Genauigkeitsanforderung genügt. Der Begriff **"Drift"** ist dabei ebenfalls weit gefasst zu verstehen, und umfasst jegliche Ortsveränderung, sei sie durch echtes Driften des biegeschlaften Trägers oder aber beispielsweise durch thermo-mechanische Deformation oder Kriechen oder Setzung von Materialien und Bauteilen bedingt. Die Größe des zulässigen Driftvolumens hängt, da sie über die genannte Genauigkeitsanforderung definiert ist, unter anderem von den im Vermessungssystem verwendeten lokal wirkenden Vermessungselementen und deren für die Anwendung erforderlicher Anordnung und Anzahl ab. Die erreichbare Genauigkeit in der Positionsbestimmung hängt zum Beispiel stark davon ab, wie - abhängig vom Ort des zu vermessenden Antennenelements relativ zu den Vermessungselementen - die Schnittwinkel ausfallen bei einer nur auf Entfernungsmessungen beruhenden Positionsbestimmung durch von bekannten Punkten des Vermessungssystems, sogenannten Referenzknoten, ausgehendem Vorwärtsschnitt. Flache Schnittwinkel liefern schlechtere Genauigkeiten. Schnittwinkel um 90° ermöglichen hohe Genauigkeiten. Andererseits können auch Geometrien mit spitzwinkligen Dreiecken durchaus ausreichende Genauigkeit liefern, unter anderem auch dadurch, dass Entfernungen zu mehreren Punkten, d.h. zu mehreren Referenzknoten gemessen werden und damit mit Überbestimmung gearbeitet wird. Dies erweitert in solchen Fällen das zulässige Driftvolumen. Der biegeschlaife Träger kann und darf von daher innerhalb dieses zulässigen Driftvolumens mehr oder weniger beliebige Form und Position einnehmen, solange ein wesentlicher Flächenanteil in Zielrichtung ausgerichtet ist. Die Genauigkeitsanforderungen an die geometrische Form des biegeschlaften Trägers sind also grob und unkritisch und weit entfernt von den sonst üblichen mechanisch-konstruktiven λ/n -Genauigkeitsanforderungen.

[0062] Hinsichtlich der Vermessung der Einzelantennenelemente ist es ebenfalls wichtig zu bemerken, dass eine Positionsgenauigkeit der Einzelantennenelemente relativ zum Sende- oder Empfangsziel unerheblich ist, soweit nicht bei relativ kurzen Distanzen gekrümmte Wellenfronten zu berücksichtigen sind. Hinsichtlich der Ausrichtung der Anordnung der Einzelantennenelemente in Bezug zur Zielrichtung muss diese so genau sein, dass die Sendekeule das Ziel so trifft, dass ein ausreichendes Signal dort empfangen werden kann. Im Empfangsfall gilt das sinngemäß umgekehrte. Diese Ausrichte- oder auch Zielgenauigkeit wird also bestimmt durch die Form der Antennenkeulen, d.h. den Grad der Bündelung, als auch die Größe der Antenne der Gegenstation als auch die Entfernung zwischen den beiden Stationen.

[0063] Der Begriff **"Antenne"** ist in der vorliegenden Schrift breit zu verstehen und soll starre und flexible Antennen umfassen. Insbesondere sind unter dem Begriff auch Phased-Array-Antennen, auch solche, die auf einem biegeschlaften Träger aufgebracht sind, zu verstehen. Solche auf einem biegeschlaften Träger aufgetragenen Phased-Array-Antennen werden in diesem Dokument auch vereinfachend als biegeschlaife Phased-Array-Antennen bezeichnet.

[0064] Auch der Begriff **"biegeschlaifer Träger"** ist breit zu verstehen und kann beispielsweise eine Membran, ein textiler Körper, eine Folie, ein Netz, o.ä., sein. Aber auch die Oberfläche einer Flüssigkeit, beispielsweise eine Wasseroberfläche, soll unter den Begriff "biegeschlaifer Träger" genauso wie ein unregelmäßiger Untergrund, beispielsweise auch ein unregelmäßiger Erd- oder Himmelskörperuntergrund verstanden werden, auf dem Einzelantennenelemente z.B. ausgestreut sind. Weiterhin soll auch eine quasistatisch, d.h. insbesondere nicht schwingende, verformbare Anordnung, beispielsweise ein quasistatisch knitterndes Blech, unter dem Begriff verstanden werden. Mit anderen Worten ist auch der Begriff "biegeschlaiff" selbst breit auszulegen. Unter Biegeschlaiffheit wird hier die Eigenschaft jedes Trägers verstanden, der zeitlich nicht formstabil ist oder sein kann. Biegeschlaife Strukturen haben keine Normalfall-Geometrie.

[0065] Unter dem Begriff **"quasi-eben"** in Hinsicht auf den biegeschlaften Träger ist zu verstehen, dass der biegeschlaife Träger grob näherungsweise eben ist, d.h. auch zulässige größere Auslenkungen aus der Ebenheit aufweisen kann, wie beispielsweise eine auf einer Wiese ausgebreitete Picknickdecke oder ein auf einer Wäscheleine aufgehängtes, leise im Wind flatterndes Bettlaken oder eine auf einer leicht bewegten Wasseroberfläche schwimmende Folie. Die Quasi-Ebenheit kann durch grobes Aufspannen anhand einer geeigneten mechanischen Vorrichtung unterstützt oder

realisiert sein oder, z.B. im Weltraum durch Fliehkraftstabilisierung, indem der biegeschlaffe Träger an den Ecken mit Gewichten ausgestattet ist und um einen zum Beispiel nahe seines Flächenschwerpunkts befindlichen Massenschwerpunkt der Anordnung langsam rotiert.

[0066] Bezüglich des biegeschlaffen Trägers ist unter dem Begriff **"im Wesentlichen in Zielrichtung ausgerichtet"** zu verstehen, dass ein wie vorgenannt quasi-ebener biegeschlaffer Träger derart näherungsweise in Zielrichtung ausgerichtet ist, dass ein wesentlicher Flächenanteil des biegeschlaffen Antennenarrays zu der in Zielrichtung wirksamen projizierten Fläche beiträgt, was gleichbedeutend damit ist, dass die auf diesem projizierten Flächenanteil vorhandenen Einzelantennenelemente, d.h. eine wesentliche Anzahl der Einzelantennenelemente eine freie Sichtlinie zum Ziel haben. Die Einschränkung der "wirksamen" projizierten Fläche ist an dieser Stelle erforderlich, da beispielsweise je nach Ausführungsform die Rückseite des Trägers nicht beiträgt oder Einzelantennenelemente, die nicht omnidirektional sind und zu schräg zur Blickrichtung liegen, nicht wirksam sind.

[0067] Auch der Begriff **"Antennenelement"** ist breit und nicht nur im strikt wissenschaftlichen Sinn zu verstehen, bezieht sich also nicht nur beispielsweise auf ein einziges Dipol oder ähnliche einfache Grundelemente des Antennenbaus. Ein Antennenelement auf einer Membran als Träger kann auch eine kompakte Anordnung von verschiedenen Dipol- und Leitungs-"Fingern" oder eine komplexe Form wie beispielsweise eine Patch-Antenne sein. Auch solche Antennenelemente, die schon eine gewisse inhärente Richtcharakteristik haben sowie solche, die gar keine, also eine omnidirektionale Richtcharakteristik haben, werden hier unter "Antennenelement" verstanden.

[0068] Unter dem Begriff **"Position eines Einzelantennenelements (EAE)"** ist der innerhalb oder außerhalb eines baulich-räumlich ausgedehnten (d.h. nicht ideal punktförmigen) Einzelantennenelements liegende Ort zu verstehen, der für die Bestimmung der Phasenlageneinstellung maßgebend ist. Dieser Ort ist das Zentrum einer abgestrahlten Welle im Fernfeld und liegt nicht bei allen Antennenelement-Formen im Zentrum der eigentlichen Hardware, weshalb für die Bestimmung dieses Ortes und der daraus abgeleiteten Phasenlageneinstellung je nach Ausführung auch die Ausrichtung des baulich-räumlich ausgedehnten Einzelantennenelements, im Folgenden die **"Ausrichtung des Einzelantennenelements"** relevant sein kann.

[0069] Der Begriff **"Vermessungssystem"** ist ebenfalls breit zu verstehen dahingehend, dass das Vermessungssystem alle technischen Mittel umfasst, die erforderlich sind, um die Position und/oder die Ausrichtung der Einzelantennenelemente relativ zur Zielrichtung, d.h. zur Sende- bzw. Empfangsrichtung zu bestimmen. Das Vermessungssystem kann sich unterteilen in ein ebenfalls breit zu verstehendes lokal wirkendes und ein ebenfalls breit zu verstehendes übergeordnet wirkendes Vermessungssystem.

[0070] Der Begriff **"Zielrichtung"** ist ebenfalls breit zu verstehen und meint beispielsweise bei mehr oder weniger statischen Anwendungen die direkte geometrische Zielrichtung auf den geometrischen Ort des Ziels, also die gegenwärtige Sende- beziehungsweise Empfangsrichtung. Das Ziel kann dabei zum Beispiel die Gegenstation auf der Erde oder auf einem Himmelskörper sein oder ein aufgrund der Entfernung zeitlich quasi unbewegt erscheinendes langsam bewegtes Raumfahrzeug. Andererseits soll unter Zielrichtung aber beispielsweise auch ein sogenanntes "Zielen mit Vorhalt" verstanden werden, welches bei entsprechend großer Relativgeschwindigkeit zwischen der Richtantenne und dem Ziel erforderlich wird. Unter Zielrichtung wird in diesem Fall dann die Richtung verstanden, unter der beispielsweise im Sendefall unter Berücksichtigung der Signallaufzeit auf den Ort gezielt wird, an dem sich das Ziel nach Verstreichen der Signallaufzeit befinden wird. Im Empfangsfall muss entsprechend auf den Ort gezielt werden, an dem sich das sendende Ziel zum Zeitpunkt der Abstrahlung befunden hat.

[0071] Das erfindungsgemäße Vermessungssystem verwendet nach Stand der Technik bekannte Vermessungselemente, wie zum Beispiel elektromagnetische Entfernungsmesser, was zum Beispiel elektrooptische Entfernungsmesser wie insbesondere Laser-Entfernungsmesser als auch beispielsweise mikrowellenbasierte Entfernungsmesser sein können. Genauso kann dies auch die Kombination solcher Entfernungsmesser mit Winkelmesssystemen beinhalten, wie sie zum Beispiel von Tachymetern als auch von Lasertrackersystemen bekannt sind. Genauso kann dies auch nach dem GPS-Prinzip oder LORAN-Prinzip arbeitende Systeme unterschiedlichster Bauart umfassen. Dies kann auch Vermessungselemente umfassen wie beispielsweise ein Navigations- und Lagebestimmungssystem eines Raumfahrzeugs (in der Fachsprache der Satellitennavigation: "Lage" = Ausrichtung), beispielsweise sogenannte Startracker oder Sternekameras, mit denen die winkelmäßige Ausrichtung bestimmt wird, worüber dann der Bezug zur Zielrichtung herstellbar ist.

[0072] Allen diesen Vermessungselementen gemeinsam ist, dass sie im Zusammenwirken die aus der Anwendung resultierende und geforderte λ/n -Genauigkeit ermöglichen, was beispielsweise bei den Entfernungsmessern durch die Wahl eines geeigneten Wellenlängenbereichs oder geeigneter Kombinationen von Wellenlängenbereichen und/oder Wahl geeigneter Modulationsverfahren erreicht wird. Sinngemäß dasselbe gilt, wenn Winkelmessverfahren als Teil des Vermessungssystems verwendet werden.

[0073] Hinsichtlich der Teilaufgaben, die das erfindungsgemäße Vermessungssystem erfüllen soll, also zum einen die Position der Einzelantennenelemente relativ zueinander zu bestimmen, des Weiteren die Ausrichtung dieser Anordnung von Einzelantennenelementen relativ zur Sendebeziehungsweise Empfangsrichtung zu bestimmen und des Weiteren gegebenenfalls auch die Ausrichtung aller Einzelantennenelemente relativ zur Sende- beziehungsweise Emp-

fangsrichtung zu bestimmen, ist es einleuchtend, dass dies beispielsweise, aber nicht zwingend von verschiedenen Teilen eines Vermessungssystems erledigt werden kann. Dies kann beispielsweise in Form eines lokal wirkenden Vermessungssystems und eines übergeordnet wirkenden Vermessungssystems gelöst sein. Dabei führt das lokal wirkende Vermessungssystem die Vermessung der Einzelantennenelemente hinsichtlich ihrer Position relativ zueinander und relativ hinsichtlich eines oder mehrerer lokaler, beispielsweise in der Struktur der Richtantenne fest verankerter Bezugspunkte, sogenannter Referenzknoten, durch. Genauso führt dieses lokal wirkende Vermessungssystem gegebenenfalls dann die Bestimmung der Ausrichtung der Einzelantennenelemente relativ zueinander sowie relativ zu den lokalen Bezugspunkten, den Referenzknoten, durch. Demgegenüber führt das übergeordnet wirkende Vermessungssystem die Vermessungen durch, die erforderlich sind, um die Ausrichtung der lokal vermessenen Anordnung der Einzelantennenelemente und der lokalen Referenzknoten relativ zur Zielrichtung und gegebenenfalls auch die Entfernung zum Ziel zu bestimmen. Die Erfindung lässt sich besonders vorteilhaft einsetzen, wenn die Tragstruktur, die die Referenzknoten trägt, nicht ausreichend steif, formtreu und in ausreichender Genauigkeit vorvermessen ist, da die Genauigkeit der Positions- und gegebenenfalls Ausrichtungsbestimmung der Einzelantennenelemente von der Genauigkeit abhängt, mit der die Position der Referenzknoten hinsichtlich des übergeordnet wirkenden Vermessungssystems bekannt ist. Das Vermessungssystem kann in der Lage sein, auch die Position der Referenzknoten relativ zueinander und relativ zu den Vermessungselementen des übergeordnet wirkenden Vermessungssystems in der erforderlichen Genauigkeit jeweils nach Bedarf immer wieder neu zu vermessen. Eine Neuvermessung der Referenzknoten ist beispielsweise dann erforderlich, wenn seit der letzten Vermessung eine Zeit vergangen ist, nach der aufgrund der Kenntnis der strukturellen Eigenschaften der Tragstruktur und/oder zwischenzeitlich stattgefundenen Vorgänge (beispielsweise mechanische Grobausrichtung des Systems und damit verbundene mechanische Lasten, oder aber beispielsweise Wechsel der Sonneneinstrahlung) davon ausgegangen werden muss, dass die Tragstruktur sich deformiert hat und die erforderliche Positionskenntnis nicht mehr gegeben ist. Nach einer solchen Neuvermessung können die konstruktiv-mechanischen Anforderungen an die Steifigkeit und Formstabilität der die Referenzknoten tragenden Struktur reduziert werden, solange die Neuvermessung der Referenzknoten so genau und so schnell erfolgt, dass die darauf aufbauende Vermessung der Einzelantennenelemente mit der erforderlichen λ/n -Genauigkeit möglich ist.

[0074] Im Gegensatz zu einem aufgeteilten Vermessungssystem, wie es oben beschrieben wurde, sind genauso aber auch Ausführungsformen denkbar, in denen die genannten Vermessungsaufgaben von einem nicht in Einzelelemente unterteilten Vermessungssystem gelöst werden.

[0075] In einer vorteilhaften Ausführungsform der Richtantenne ist der biegeschlafe Träger ausrichtbar. Durch eine Ausrichtung des biegeschlaffen Trägers im Wesentlichen zum Ziel können Einzelantennenelemente, im besten Fall alle Einzelantennenelemente, eine freie Abstrahl- beziehungsweise Empfangsrichtung zum beziehungsweise vom Ziel haben. Mit anderen Worten, der biegeschlafe Träger ist so ausreichend quasi-eben, dass es keine Hinterschneidung gibt, in der einzelne Teile der Antenne durch andere Teile der Antenne in Richtung der gewünschten Abstrahl- oder Empfangsrichtung verdeckt sind. Eine solche Anordnung kann erreicht werden beispielsweise durch ein mechanisch einfaches Aufspannen des biegeschlaffen Trägers mithilfe beispielsweise eines Rahmens oder eines Mastsystems. Da aufgrund der erfindungsgemäß durchgeführten Vermessung der biegeschlafe Träger innerhalb eines unkritisch großen zulässigen Driftvolumens liegen darf, bedeutet dies, dass das Aufspannen des biegeschlaffen Trägers keine hohen mechanischen Anforderungen an die aufspannende Tragstruktur stellt. Sowohl die aufspannende Tragstruktur als auch der biegeschlafe Träger selber dürfen sich zum Beispiel thermomechanisch verformen. Der biegeschlafe Träger darf Falten aufweisen, wie sie typischerweise beim Aufspannen beispielsweise einer rechteckigen Membran oder eines Tuchs auftreten, wenn man dieses an den Ecken, den sogenannten Aufspannpunkten, aufspannt. Der biegeschlafe Träger darf beispielsweise auch so schlaff aufgespannt sein, dass er durchhängen würde, wenn er unter Schwerkraft aufgehängt wäre oder sich wölben würde, wenn er unter Windeinwirkung in einer Atmosphäre aufgespannt oder auch nur aufgehängt wäre. Die Aufspannpunkte müssen dabei auch nicht hochgenau in einer Ebene liegen, vielmehr dürfen die Aufspannpunkte hinsichtlich ihrer relativen Lage untereinander von der Ebenheit abweichen, sei es, weil dadurch die Fertigung erleichtert ist oder sei es, dass es andere konstruktive Zwänge oder Vorteile gibt, die Aufhängepunkte nicht in einer Ebene anzuordnen. Allen diesen Beispielen ist gemeinsam, dass die erfindungsgemäße Richtantenne nach dem später beschriebenen erfindungsgemäßen Verfahren betreibbar ist, solange der biegeschlafe Träger innerhalb des zulässigen Driftvolumens liegt, das heißt, solange alle Einzelantennenelemente durch das Vermessungssystem mit der geforderten λ/n -Genauigkeit hinsichtlich ihrer relativen Position zueinander und zu den Referenzknoten des Vermessungssystems und gegebenenfalls hinsichtlich ihrer Ausrichtung relativ zueinander und zu den Referenzknoten einmeßbar sind.

[0076] Die Richtantenne kann aber auch so ausgeführt sein, dass sie nicht mechanisch ausrichtbar ist, sondern beispielsweise fest montiert oder fest aufgespannt ist oder beispielsweise eine vorhandene Oberfläche den tragenden Untergrund für den biegeschlaffen, die Einzelantennenelemente tragenden Träger bildet. Der Untergrund fungiert hier lediglich als Träger der Richtantenne, während der biegeschlafe Träger ordnet, ohne den biegeschlaffen Träger käme es zu einer freien Streuenausbringung. Solch eine vorhandene Oberfläche könnte zum Beispiel die Oberfläche eines Geländes sein, sei es eben oder aber beispielsweise an einer Felswand herabhängend, sei es auf der Erde oder auf

einem Himmelskörper. Genauso könnte eine solche tragende Oberfläche auch durch die Oberfläche eines Gewässers oder einer anderen Flüssigkeitsansammlung, sei es auf der Erde oder auf einem anderen Himmelskörper gebildet sein. Bei auf einer Wasseroberfläche oder Flüssigkeitsoberfläche ausgebrachten Antennenelementen werden die Einzelantennenelemente vorteilhafterweise auf einem biegeschlaffen Träger ausgebracht, der als ein Netz ausgestaltet ist und bei dem die Netzknoten mit für das Stauen vorteilhafterweise flexiblen, aber im entpackten Zustand dann hinreichend eigensteifen Verbindungselementen miteinander verbunden sind, die steif genug sind, um einerseits ein Auseinanderdriften (Zugbelastung auf die Verbindungselemente) und andererseits Klumpenbildung (Druckbelastung auf die Verbindungselemente) zu vermeiden. Im Fall einer Geländeoberfläche können dann auch die Referenzknoten des Vermessungssystems auf der Geländeoberfläche in geeigneter Weise, beispielsweise durch eine oder mehrere geeignet dimensionierte und ausgeformte Tragkonstruktionen, ausgebracht sein. Im Fall einer Flüssigkeitsoberfläche können die Referenzknoten des Vermessungssystems auf schwimmenden Trägern, beispielsweise Bojen mit langen Masten angeordnet sein, die eine geeignete Polyederform der Referenzknotenordnung gewährleisten, um eine ausreichende Genauigkeit des Vermessungssystems zu ermöglichen. In diesem Fall müssen auch die schwimmenden Träger der Referenzknoten beispielsweise durch Abstandselemente in geeignetem Abstand und geeigneter Anordnung gehalten werden.

[0077] Genauso ist eine Anordnung denkbar, in der die Antennenelemente ebenso wie die Referenzstationen beispielsweise mit Ballons und einem geeigneten biegeschlaffen Netz zur Vermeidung von Drift und/oder Klumpenbildung entweder senkrecht herabhängend oder mehr oder weniger waagrecht aufgespannt oder auch in beliebig anderer Anordnung in der Atmosphäre ausgebracht sind. Eine solche Anordnung in einer Atmosphäre kann dann sowohl mit als auch ohne Vorrichtungen zur groben Ausrichtung ausgestattet sein.

[0078] Das Vermessungssystem kann so ausgelegt sein, dass das zulässige Driftvolumen bewusst so voluminös ausgestaltet ist, dass selbst gewollt dreidimensionale Konfigurationen des biegeschlaffen Trägers erlaubt sind, die beispielsweise aus verschwenkt zueinander liegenden quasi-ebenen Teilflächen bestehen. Für diese Teilflächen gilt dann sinngemäß dasselbe, wie es im vorhergehenden Abschnitt beispielsweise hinsichtlich des Aufspannens, Durchhängens und Faltenwerfens beschrieben ist.

[0079] Es kann sogar erlaubt sein, dass der biegeschlaffe Träger sich auch derart verformen darf, dass relativ zur Zielrichtung auch Hinterschneidungen auftreten, das heißt, dass nicht alle Einzelantennenelemente eine freie Abstrahl- oder Empfangsrichtung zum Ziel haben, sondern diese durch andere Einzelantennenelemente oder Teile des biegeschlaffen Trägers abgeschattet werden. Solange ein wesentlicher Flächenteil des biegeschlaffen Antennenarrays zu der in Zielrichtung projizierten Fläche beiträgt und damit eine wesentliche Anzahl der Einzelantennenelemente eine freie Sichtlinie zum Ziel haben und damit zum Sendebeziehungsweise Empfangsbetrieb beitragen können und solange diese Einzelantennenelemente innerhalb des zulässigen Driftvolumens liegen, ist die erfindungsgemäße Funktionsweise und Betreibbarkeit der Richtantenne gegeben. Die kritische Begrenzung liegt dabei darin, dass hinsichtlich des Anwendungsfalls die Anzahl der beitragenden Einzelantennenelemente ausreicht, um die aus der Anwendung erforderliche Antennenqualität und damit Signalqualität zu gewährleisten. Oder mit anderen Worten, dass der wesentliche Flächenanteil beziehungsweise die wesentliche Anzahl an beitragenden Einzelantennenelementen groß genug ist.

[0080] In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform weist das Vermessungssystem ein lokal wirkendes und ein übergeordnet wirkendes Vermessungssystem auf, wobei mit dem lokal wirkenden Vermessungssystem lokale Positionen und/oder Ausrichtungen bestimmbar und mit dem übergeordnet wirkenden Vermessungssystem der Bezug zwischen den lokalen Positionen und/oder Ausrichtungen der Einzelantennenelemente und der Zielrichtung herstellbar ist. Dabei führt das lokal wirkende Vermessungssystem die Vermessung der Einzelantennenelemente hinsichtlich ihrer Position relativ zueinander und relativ hinsichtlich eines oder mehrerer lokaler, beispielsweise in der Struktur der Richtantenne fest verankerter Bezugspunkte, sogenannter Referenzknoten, durch. Genauso führt dieses lokal wirkende Vermessungssystem gegebenenfalls dann die Bestimmung der Ausrichtung der Einzelantennenelemente relativ zueinander sowie relativ zu den lokalen Bezugspunkten, den Referenzknoten, durch. Demgegenüber führt das übergeordnet wirkende Vermessungssystem die Vermessungen durch, die erforderlich sind, um die Ausrichtung der lokal vermessenen Anordnung der Einzelantennenelemente und der lokalen Referenzknoten relativ zur Zielrichtung und gegebenenfalls auch die Entfernung zum Ziel zu bestimmen.

[0081] In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform sind einzelne Einzelantennenelemente abschaltbar. In der Phasenlagenbestimmungseinheit kann gleichzeitig neben der Phasenlage aufgrund der bekannten Positionen und ggfs. Ausrichtungen der Einzelantennenelemente auch bestimmt werden, welche Antennenelemente aufgrund von Drift des biegeschlaffen Trägers in Hinterschneidung relativ zur Abstrahl- beziehungsweise Empfangsrichtung sind und somit also nicht wirksam zum Sende-/Empfangsbetrieb beitragen oder für welche, beispielsweise bei stark gerichtet arbeitenden Einzelantennenelementen, deren Ausrichtung und damit deren Hauptantennenkeule ungünstig hinsichtlich der Abstrahl- beziehungsweise Empfangsrichtung liegt. Diese Einzelantennenelemente können dann abgeschaltet werden, um Energie zu sparen und um unerwünschte Nebenkeulen im Signal zu vermeiden.

[0082] In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform weist der biegeschlaffe Träger der Richtantenne eine Vorder- und eine Rückseite auf, wobei auf jeder der beiden Seiten ein eigenes Sende- und/oder Empfangssystem untergebracht

ist, derart, dass auf einer ersten Seite empfangene Signale auf der zweiten Seite abstrahlbar bzw. auf der zweiten Seite empfangene Signale auf der ersten Seite abstrahlbar sind, wobei entweder durch elektromagnetische Abschirmung durch den biegeschlaffen Träger oder durch Wahl geeignet separierter Frequenzen sichergestellt ist, dass keine störenden Interferenzen oder andere unerwünschte Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Sende-/Empfangssystemen auftreten. Durch eine solche Anordnung ist es dann möglich, eine Relaisstation zu realisieren, die auf der einen Seite von einer Gegenstelle einkommende Signale empfängt und sie dann auf der anderen Seite zu einer weiteren Gegenstation weitersendet. Gleichzeitig ist es dabei möglich, dass auch nur auf der einen oder nur auf der anderen Seite der Richtantenne Signale ausgetauscht werden, beispielsweise um den Empfang eines Signals zu quittieren oder Statusinformation zum Status der Richtantenne zu übermitteln. Genauso ist es denkbar, dass eine solche als Relaisstation fungierende Richtantenne neben dem reinen Richtfunkbetrieb als Relaisstation auch auf anderen Wegen, zum Beispiel mit einem die Relaisstation tragenden Raumfahrzeug, Daten austauscht, die in den Richtfunkbetrieb auf der Relaisstrecke in die eine oder die andere Richtung einfließen. Hierbei könnte es sich beispielsweise um technische Statusinformation zum Status des Raumfahrzeugs handeln. Damit die Sende-/Empfangssysteme, die auf Vorder- und Rückseite angeordnet sind, sich technisch nicht gegenseitig stören, muss entweder durch Verwendung beispielsweise eines elektrisch leitfähigen biegeschlaffen Trägers sichergestellt werden, dass die beiden Seiten elektromagnetisch gegeneinander abgeschirmt sind. Oder aber die unerwünschte Wechselwirkung zwischen Vorder- und Rückseite wird dadurch erreicht, dass die Sende-/Empfangssysteme der beiden Seiten in ausreichend weit auseinanderliegenden Wellenlängenbereichen arbeiten.

[0083] In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform ist der biegeschlafe Träger elektrisch abschirmend und damit gleichzeitig elektromagnetische Wellen reflektierend. Wirkt der biegeschlafe Träger aufgrund elektrischer Leitfähigkeit elektromagnetisch abschirmend, können beispielsweise auf der Vorderseite die Einzelantennenelemente eines Sende-/Empfangssystems untergebracht sein und in einem bestimmten Wellenlängenbereich arbeiten, während auf der Rückseite das Vermessungssystem untergebracht ist und in einem dicht benachbarten oder sogar demselben Wellenlängenbereich arbeiten kann, ohne dass dabei störende Interferenzen oder andere unerwünschte Wechselwirkungen zwischen dem Sende-/Empfangssystem auf der Vorderseite und dem Vermessungssystem auf der Rückseite entstehen.

[0084] In einer alternativen Ausführungsform weist der biegeschlafe Träger der Richtantenne eine Vorder- und eine Rückseite auf, wobei auf jeder der beiden Seiten ein eigenes Sende- und/oder Empfangssystem untergebracht ist, derart, dass auf einer ersten Seite empfangene Signale auf der zweiten Seite abstrahlbar bzw. auf der zweiten Seite empfangene Signale auf der ersten Seite abstrahlbar sind, wobei durch Wahl geeignet separierter Frequenzen sichergestellt ist, dass keine störenden Interferenzen oder andere unerwünschte Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Sende-/Empfangssystemen auftreten.

[0085] In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform weist das Vermessungssystem mindestens einen Referenzknoten, bevorzugt mindestens drei nicht auf einer Geraden liegende Referenzknoten und besonders bevorzugt mindestens vier Referenzknoten auf, wobei die mindestens vier Referenzknoten jeweils auf einer Ecke eines Polyeders verteilt sind, wobei der Polyeder mindestens so viele Ecken aufweist, wie die Richtantenne Referenzknoten aufweist. Ist die Position und Ausrichtung des mindestens einen Referenzknotens relativ zum übergeordnet wirkenden Vermessungssystem, beispielsweise einem Navigations- und Lagebestimmungssystem bekannt - sei es aufgrund mechanisch-konstruktiv fester Verbindung zu den Vermessungselementen des übergeordnet wirkenden Vermessungssystems oder aus aktuell jeweils durchgeführter Vermessung des bzw. der Referenzknoten - und in geeignetem Abstand zum biegeschlaffen Träger angeordnet, wird ein großräumiges, voluminöses zulässiges Driftvolumen ermöglicht. Dieser Referenzknoten kann beispielsweise mit einem elektromagnetischen Entfernungsmesser in Kombination mit einem Winkelmesssystem ausgestattet sein, wie dies bei Tachymetern oder Laser-Tracker-Systemen der Fall ist. Weiterhin kann das Vermessungssystem eine geeignete Anordnung von beispielsweise einem oder mehreren Retroreflektoren pro Einzelantennenelement aufweisen, derart, dass aus den gemessenen Strecken und Winkeln die Positionen und gegebenenfalls auch die Ausrichtungen der Einzelantennenelemente bestimmt werden können. Stattet man solch ein System beispielsweise mit zwei oder mehr solcher Referenzknoten aus, so erhöht man die Genauigkeit des Vermessungssystems durch Überbestimmung im Sinne beispielsweise der Gauß'schen Ausgleichsrechnung.

[0086] Bevorzugt weist das Vermessungssystem mindestens drei nicht auf einer Geraden liegende Referenzknoten auf. Ist deren Positions- und Ausrichtungsbeziehung relativ zum übergeordnet wirkenden Vermessungssystem bekannt - sei es, mechanisch-konstruktiv oder aus Vermessung der Referenzknoten - und sind die mindestens drei Referenzknoten in geeignetem Abstand und geeigneter Anordnung zum biegeschlaffen Träger angeordnet, wird wieder ein großräumiges, voluminöses zulässiges Driftvolumen ermöglicht. Diese Referenzknoten können beispielsweise mit elektromagnetischen Entfernungsmessern ausgestattet sein, um im Zusammenwirken mit geeigneten Anordnungen von beispielsweise einem oder mehreren Retroreflektoren pro Einzelantennenelement aus den gemessenen Strecken die Positionen und ggfs. Ausrichtungen der Einzelantennenelemente zu bestimmen. Sind die Referenzknoten zusätzlich mit Winkelmesssystemen ausgestattet, so erhöht man dadurch, genauso wie oben genannt, die Genauigkeit des Vermessungssystems durch Überbestimmung.

[0087] In der besonders bevorzugten Ausführungsform weist das Vermessungssystem mindestens vier nicht in einer

Ebene liegende Referenzknoten auf, die idealerweise einen voluminösen, d.h. nicht flachen Polyeder mit mindestens so vielen Ecken, wie Referenzknoten vorhanden sind, aufspannen. Sind deren Positions- und Ausrichtungsbeziehung relativ zum übergeordnet wirkenden Vermessungssystem bekannt - sei es aus deren bekannter mechanisch-konstruktiver Anordnung oder aus Vermessung der Referenzknoten - und befinden sich die Referenzknoten in geeignetem Abstand und geeigneter Anordnung zum biegeschlaffen Träger, wird ein großräumiges, voluminöses zulässiges Driftvolumen ermöglicht. Dies kann beispielsweise dadurch erreicht werden, dass der Polyeder den biegeschlaffen Träger in weiten Teilen, aber nicht notwendigerweise vollständig umfasst, wobei durch günstige Schnittbildung in der Positionsbestimmung ein voluminöses, großvolumiges auch über den Tetraeder bzw. Polyeder hinausreichendes zulässiges Driftvolumen ermöglicht wird. Bei vier Referenzknoten sind auch lokal arbeitende GPS-ähnliche lokale Vermessungssysteme denkbar, bei denen modulierte Signale von den Referenzknoten ausgesandt werden und durch deren Empfang ein geeigneter Empfänger in den Einzelantennenelementen sowohl seine drei Lagekoordinaten als auch bei typischerweise, weil technisch einfacher, nicht synchronisierten Uhren eine mögliche Unbekannte in der Zeit bestimmen kann. In diesem Fall würden die Einzelantennenelemente ihre Position selbst relativ zu den Referenzknoten vermessen. Dies könnte beispielsweise die vorteilhafte Möglichkeit eröffnen, auch die Phasenlagenbestimmung dezentral im Einzelantennenelement durchzuführen und von einem zentralisierten Ansatz auf einen dezentralisierten Ansatz zu wechseln.

[0088] Somit ist bzw. sind in einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform der Richtantenne der oder die Referenzknoten entweder auf einer derart steifen und formstabilen Tragstruktur relativ zu den übrigen Elementen des übergeordnet wirkenden Vermessungssystems angeordnet, sodass keine Neuvermessung der Referenzknotenpositionen während des Betriebes notwendig ist zur Erreichung der erforderlichen λ/n -Genauigkeit, oder aber das Vermessungssystem der Richtantenne weist eine Selbstvermessungsvorrichtung für die Referenzknoten auf, sofern die Tragstruktur nicht ausreichend formstabil ist, sodass eine Neuvermessung der Referenzknoten im Verlauf des Betriebs im Rahmen des Betriebsverfahrens erforderlich ist, um eine vorgegebene Genauigkeit als vorgegebener Bruchteil $1/n$ der Trägerwellenlänge λ zu erreichen.

[0089] In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform weist die Richtantenne ein Blickfeld auf, wobei die Referenzknoten außerhalb des Blickfelds der Richtantenne angeordnet sind. Unter dem Begriff "Blickfeld" wird hier der Bereich verstanden, aus dem die Richtantenne elektromagnetische Signale empfangen kann, beziehungsweise in den die Richtantenne elektromagnetische Signale abstrahlen kann. Das Blickfeld entspricht der in Zielrichtung wirksamen, das heißt, der in Zielrichtung projizierten Fläche des biegeschlaffen Trägers. Durch die Anordnung der Referenzknoten außerhalb des Blickfelds wird das Blickfeld der Richtantenne nicht behindert.

[0090] In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform weist das Vermessungssystem der Richtantenne auch solche Vermessungselemente auf, mit denen hinsichtlich des übergeordnet wirkenden Vermessungssystems die Ausrichtung relativ zur Zielrichtung als auch gegebenenfalls die Position relativ zum Ziel in einem übergeordneten Koordinatensystem durch Anmessen von externen hinsichtlich ihrer Position in besagtem übergeordneten Koordinatensystem bekannten Punkten bestimmbar ist. Damit werden zusätzliche Einsatzmöglichkeiten für die Richtantenne eröffnet insbesondere auch für solche Fälle, in denen nur über normale, sozusagen "on-board" Vermessungselemente des übergeordnet wirkenden Vermessungssystems eine Orientierung nicht möglich sein sollte. Das beschriebene Anmessen bekannter Punkte entspricht in analoger Weise den terrestrischen Vermessungsverfahren, bei denen von übergeordneten, bekannten Punkten auf die Position nachgeordneter Punkte durch Vermessung geschlossen wird.

[0091] Ein erfindungsgemäßes Richtantennensystem ist dadurch gekennzeichnet, dass das Richtantennensystem eine Mehrzahl von Richtantennen gemäß der vorherigen Beschreibung aufweist. Die Mehrzahl der Richtantennen können dahingehend zusammenwirken, dass sie wie eine einzige Richtantenne besonders großer Fläche wirken. Mit anderen Worten wird erfindungsgemäß ein übergeordnetes, großes Richtantennensystem aus einer Vielzahl von untergeordneten, kleineren erfindungsgemäßen Richtantennen gebildet, die zusammengefasst eine insgesamt größere Antenne mit zusammengekommen höherem Antennengewinn bei gleichbleibender Qualität der Signalausrichtung beziehungsweise Empfangsrichtung bilden.

[0092] Sämtliche vorteilhaften Ausführungsformen, die für die Richtantenne benannt wurden, gelten sinngemäß übertragen auch für das erfindungsgemäße Richtantennensystem.

[0093] Das erfindungsgemäße Richtantennensystem besteht aus einer im Sinne einer größeren Antenne zusammenwirkenden Anzahl von Gruppen von Einzelantennenelementen, wobei jede dieser Gruppen einer erfindungsgemäßen Richtantenne entspricht und zum Empfang der von einem Ziel ausgestrahlten zu empfangenden elektromagnetischen Signale oder zur Sendung der zu einem Ziel abzustrahlenden elektromagnetischen Signale geeignet ist, wobei die elektromagnetischen Signale eine Trägerwellenlänge λ und eine Bandbreite B aufweisen. Die einzelnen Einzelantennenelemente sind auf einem biegeschlaffen Träger aufgebracht, wobei der biegeschlaaffe Träger quasi-eben ist, wobei alle Einzelantennenelemente derart auf dem biegeschlaffen Träger aufgebracht sind, dass, sofern der biegeschlaaffe Träger im Wesentlichen in Zielrichtung ausgerichtet ist, eine wesentliche Anzahl von Einzelantennenelementen eine freie Abstrahl- beziehungsweise Empfangsrichtung zum beziehungsweise vom Ziel hat, wobei die Richtantenne weiterhin ein Vermessungssystem aufweist, mit dem die Position und/oder Ausrichtung aller Einzelantennenelemente relativ zur Zielrichtung bestimmbar ist, wobei die Genauigkeit der Positionsbestimmung der Einzelantennenelemente relativ zu-

einander mindestens genauso oder besser ist als ein vorgegebener Bruchteil $1/n$ der Trägerwellenlänge λ , und wobei die Richtantenne weiterhin eine Phasenlagenbestimmungseinheit aufweist, mit der die in jedem Einzelantennenelement für die Abstrahlung des Sendesignals beziehungsweise die Rekonstruktion des empfangenen Signals erforderliche Phasenlage des Einzelsignals aus den bestimmten Positionen und Ausrichtungen der Einzelantennenelemente und der gewünschten Abstrahlrichtung beziehungsweise Empfangsrichtung bestimmbar ist, und wobei die Richtantenne weiterhin eine Phasenlageneinstellungseinheit aufweist, mit der die zuvor bestimmten erforderlichen Phasenlagen der Einzelsignale der Einzelantennenelemente für den Sende- beziehungsweise Empfangsvorgang jeweils einstellbar sind, und wobei die Richtantenne im Falle einer Empfangsantenne weiterhin eine Vorrichtung aufweist, mit der bezüglich des Empfangsvorgangs aus den empfangenen Einzelsignalen mit der derart eingestellten jeweiligen Phasenlage das empfangene Signal rekonstruierbar ist.

[0094] Ein erfindungsgemäßes Verfahren zum Betreiben einer vorbeschriebenen Richtantenne oder eines vorbeschriebenen Richtantennensystems weist folgende Schritte auf:

- a) Prüfen der Ausrichtung und gegebenenfalls mechanische Grobausrichtung der Richtantenne bzw. aller oder einzelner Richtantennen des Richtantennensystems in Richtung der Zielrichtung;
- b) Bestimmung der Positionen und/oder Ausrichtungen der Einzelantennenelemente der Richtantenne bzw. der Einzelantennenelemente der Richtantennen des Richtantennensystems in Bezug zur gewünschten Zielrichtung;
- c) Gegebenenfalls nochmalige mechanische Grobausrichtung gemäß Punkt a) und darauffolgend nochmalige Positions- und/oder Ausrichtungsbestimmung gemäß Punkt b);
- d) Aus der zuvor durchgeführten Positions- und/oder Ausrichtungsbestimmung der Einzelantennenelemente der Richtantenne beziehungsweise der Einzelantennenelemente der Richtantennen des Richtantennensystems und aus der gewünschten Zielrichtung Bestimmung der Phasenlage der Einzelsignale in den Einzelantennenelementen, die für die Abstrahlung des Sendesignals beziehungsweise für die Rekonstruktion des empfangenen Signals aus den in den Einzelantennenelementen empfangenen Einzelsignalen erforderlich ist, unter Verwendung der Phasenlagenbestimmungseinheit;
- e) Einstellung der zuvor bestimmten Phasenlagen für die einzelnen Einzelantennenelemente an deren jeweiligen zu sendenden Einzelsignalen beziehungsweise an deren zum zu rekonstruierenden Empfangssignal beitragenden jeweiligen empfangenen Einzelsignalen mithilfe der Phasenlageneinstellungseinheit;
- f) Senden der mit den zuvor bestimmten Phasenlagen versehenen Einzelsignale mit den jeweiligen Einzelantennenelementen beziehungsweise Rekonstruktion des empfangenen Signals aus den in den einzelnen Einzelantennenelementen empfangenen und mit den zuvor bestimmten Phasenlagen versehenen Einzelsignalen.

[0095] Die Positionen der Einzelantennenelemente können mit dem Vermessungssystem in einem weit gefassten zulässigen Driftvolumen auch über ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge hinweg verschoben sein, ohne dass dies die Wirksamkeit der Vorrichtung und des Verfahrens beeinträchtigt. Die korrekte Phasenlage wird durch das Verfahren sichergestellt, solange die Einzelantennenelemente nicht außerhalb der die geforderte Positionsbestimmungsgenauigkeit ermöglichenden nutzbaren Reichweite des Vermessungssystems, d.h. des zulässigen Driftvolumens, verdriftet sind.

[0096] In einer vorteilhaften Ausführungsform des Verfahrens wird die Signalqualität des in der Richtantenne empfangenen Signals oder des gesendeten und auf der Gegenstation empfangenen Signals dadurch optimiert, dass die empfangenen Signale als Beobachtungsdaten in einem mathematischen Optimierungsverfahren verwendet werden, mit dem die in das Verfahren eingebrachten Positionen und Ausrichtungen der Einzelantennenelemente oder die im Verfahren verwendeten Phasenlagenkorrekturen in den Einzelantennenelementen optimiert werden.

[0097] In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des Verfahrens umfasst die Bestimmung der Positionen und/oder Ausrichtungen der Einzelantennenelemente der Richtantenne beziehungsweise der Richtantennen des Richtantennensystems relativ zum Ziel folgende Aktionen, wobei die Aktionen in beliebiger Reihenfolge durchführbar sind:

- Optional Bestimmung der Positionen der Referenzknoten der Richtantenne beziehungsweise der Referenzknoten der Richtantennen des Richtantennensystems relativ zueinander und relativ zu den anderen Elementen des übergeordnet wirkenden Vermessungssystems mithilfe des lokal wirkenden Vermessungssystems;
- Bestimmung der Positionen und/oder Ausrichtungen der Einzelantennenelemente relativ zu den Positionen der Referenzknoten mithilfe des lokal wirkenden Vermessungssystems;
- Bestimmung der Zielrichtung relativ zu den Positionen der Referenzknoten mithilfe des übergeordnet wirkenden Teils des Vermessungssystems.

[0098] Die Bestimmung der Positionen der Referenzknoten der Richtantenne beziehungsweise der Referenzknoten der Richtantennen des Richtantennensystems relativ zueinander und relativ zu den anderen Elementen des übergeordnet wirkenden Vermessungssystems ist bei ausreichend steifer formstabiler Tragstruktur der Referenzknoten durch die Verwendung der a-priori vermessenen und von daher bekannten Positionen der Referenzknoten an dieser Stelle

entbehrlich. Falls aber die Tragstruktur diese Anforderung nicht erfüllt, kann mit dem dann erforderlichen Selbstvermessungssystem die Bestimmung der Positionen der Referenzknoten der Richtantenne beziehungsweise der Referenzknoten der Richtantennen des Richtantennensystems relativ zueinander mithilfe des lokal wirkenden Vermessungssystems durchgeführt werden. Das Selbstvermessungssystem ist in diesem Falle Bestandteil des lokal wirkenden Vermessungssystems.

[0099] Das Verfahren kann in Einzelschritten oder auch in einem Schritt erfolgen. Diesbezüglich ist es einleuchtend, dass diese Vermessung beispielsweise, aber nicht zwingend in den genannten einzelnen Schritten, die in unterschiedlicher Reihenfolge durchgeführt werden können, erfolgt, oder aber unter Umständen auch sozusagen "in einem Guss", in einem einzigen Schritt.

[0100] Das Messen der Positionen aller Einzelantennenelemente der Richtantenne beziehungsweise des Richtantennensystems sowie auch der Positionen der Referenzknoten kann zunächst lokal relativ zu den Referenzknoten erfolgen, wobei die Positionen anschließend durch Koordinatentransformation auf ein äußeres, übergeordnetes Koordinatensystem übertragen werden können. Sinngemäß dasselbe gilt, wenn die Referenzknoten zunächst durch Selbstvermessung ihre Positionen relativ zu den Vermessungselementen des übergeordnet wirkenden Vermessungssystems bestimmen müssen, weil die Tragstruktur der Referenzknoten nicht ausreichend steif und formstabil ist.

[0101] Alternativ kann das Messen der Positionen aller Einzelantennenelemente sowie das gegebenenfalls vorab durchzuführende Selbstvermessen der Referenzknoten der Richtantenne beziehungsweise des Richtantennensystems direkt in einem äußeren, übergeordneten Koordinatensystem erfolgen. Die beiden Alternativen sind gleichwertig und können in Abhängigkeit der verfügbaren Systeme gewählt werden.

[0102] Weiterhin kann nach einer ersten Messung der Positionen aller Einzelantennenelemente eine Groborientierung des biegeschlaffen Antennen-Arrays durchgeführt wird. Damit können die Einzelantennenelemente grob in Blickrichtung der Richtantenne ausgerichtet werden, sollten Einzelantennenelemente zu weit von der gewünschten Blickrichtung abweichen. So können mehr Einzelantennenelemente für den Empfang beziehungsweise das Senden effektiv bereitgestellt werden.

[0103] In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des Verfahrens erfolgt die Bestimmung der Position der Referenzknoten schneller als ein vorbestimmter Schwellwert, der von der Geschwindigkeit der währenddessen erfolgenden Deformationsbewegung der die Referenzknoten tragenden nicht ideal steifen Trägerstruktur abhängt.

[0104] Weiterhin hat es sich als vorteilhaft erwiesen, wenn die Bestimmung der Positionen und Ausrichtungen aller Einzelantennenelemente und die Bestimmung der erforderlichen Phasenlagen für jedes Einzelantennenelement sowie das darauf aufbauende Senden beziehungsweise Empfangen von Einzelsignalen schneller erfolgt als ein vorbestimmter Schwellwert, der von der Geschwindigkeit der währenddessen erfolgenden Driftbewegung der Einzelantennenelemente auf dem biegeschlaffen Träger als auch der die Referenzknoten tragenden nicht ideal steifen Trägerstruktur abhängt.

[0105] Das oben beschriebene Verfahren kann, wenn die Zielrichtung nicht ausreichend genau bekannt ist, auch iterativ wiederholend durchgeführt und erst durch Signalmaximierung die Zielrichtung iterativ bestimmt werden.

[0106] Der komplette Zyklus von im Sendefall Vermessung der Einzelantennenelemente plus Phasenlagenbestimmung plus Phasenlageneinstellung plus Senden in der Summe kann so schnell durchgeführt werden, dass die erforderliche λ/n -Genauigkeit der relativen Positionen der Einzelantennenelemente zueinander gegeben ist, denn nur dann sind phasenlagenrichtige Sendung beziehungsweise Empfang in einer großen, geforderten λ/n -Genauigkeit möglich. Die erforderliche λ/n -Genauigkeit ist dann gegeben, wenn die Ungenauigkeit der Positionsbestimmung, die durch ein während der Dauer des genannten Zyklus aufgetretenes - und erfindungsgemäß ausdrücklich erlaubtes - Verdriften verursacht ist plus sämtliche im Vermessungsverfahren selbst enthaltenen Ungenauigkeiten in Summe die erforderliche λ/n -Genauigkeit nicht überschreiten. Mit anderen Worten muss die Geschwindigkeit, mit der das Verfahren durchführbar ist, schneller sein als ein vorbestimmter Schwellwert, der von der Schnelligkeit der währenddessen stattfindenden Driftbewegung des die Einzelantennenelemente tragenden biegeschlaffen Trägers abhängt. Sinngemäß dasselbe gilt für den Empfangsvorgang, wobei die Situation dort insofern anders ist, als dass die Phasenlagenbestimmung und Phasenlageneinstellung als auch die dann folgende Rekonstruktion des Signals sowohl mitlaufend als auch nach dem eigentlichen Empfang des Signals und damit auch sozusagen "Off-line" stattfinden können. Die λ/n -genaue Positionskenntnis muss für den Zeitpunkt des Empfangs erfüllt sein. Zwischen der Vermessung der Einzelantennenelemente und dem Empfang muss kein weiterer Verfahrensschritt erfolgen. Die Zeit, die zwischen Vermessung und Empfang verstreicht, ist kürzer als im Sendefall, sodass die Anforderung hinsichtlich der Geschwindigkeit des Verfahrens hier entspannter ist als im Sendefall.

[0107] Man könnte auch sagen, dass im Sendefall die Vermessung, Phasenlagenbestimmung und Phasenlageneinstellung bzw. im Empfangsfall die Vermessung sozusagen in Echtzeit erfolgen. Der Begriff "Echtzeit" ist dabei in Relation zur möglichen Driftgeschwindigkeit der Referenzstationen untereinander sowie der möglichen Driftgeschwindigkeit des biegeschlaffen Trägers beziehungsweise der Einzelantennenelemente auf dem biegeschlaffen Träger zu sehen:

[0108] Die Bestimmung der Positionen der Referenzknoten, Einzelantennenelemente oder allgemein von Referenzstationen muss nur sehr viel schneller sein als diese Driftgeschwindigkeiten.

[0109] Durch die erfinderische Richtantenne, das erfinderische Richtantennensystem und das erfinderische Verfahren

zum Betreiben einer Richtantenne beziehungsweise eines Richtantennensystems ist es viel leichter möglich, große Antennen beispielsweise in den Orbit oder allgemein ins Weltall, aber auch in den terrestrischen Einsatz, zu bringen. Denn die technischen Anforderungen an die Aufspanngenaugkeit und Formtreue der Antennen sind durch die Erfindung gegenüber dem Stand der Technik völlig entschärft. Damit ist es dann auch möglich, deutlich größere Antennen zu realisieren, was bisher daran scheiterte, dass man die oben beschriebene λ/n -Genaugkeit ausschließlich über konstruktiv-mechanisch schwer erfüllbare Anforderungen an die Formgenauigkeit und Formstabilität des Antennenkörpers selber erfüllen musste, was häufig zu auch hinsichtlich der Masse schweren und hinsichtlich des Volumens sperrigen und damit für Weltraumeinsätze teuren Lösungen führte. Im Gegensatz dazu kann die Erfindung vorteilhaft bei Missionen angewendet werden, bei denen auf anderen Himmelskörpern mit wenig Aufwand eine große Antenne mit hohem Antennengewinn realisiert werden soll.

[0110] Statt einen biegeschlaffen Träger mit Antennenelementen im Raum aufzuspannen, kann man eine erfindungsgemäße Richtantenne auch auf dem Boden beispielsweise eines Himmelskörpers ausbringen. Und anstatt dabei einen biegeschlaffen Träger als verbindendes Element zu verwenden, können die einzelnen Antennenelemente auch zufällig verteilt über dem Boden ausgebracht sein. Beispielsweise können die einzelnen Antennenelemente durch einen Zentralkörper ausgebracht werden, aus dem die Menge von Einzelantennenelementen per Auswurfmechanismus regellos in einem gewissen Umkreis ausgestreut werden und dadurch ein großes Antennenarray realisieren. Alternativ können die einzelnen Antennenelemente auch bei einem Überflug großflächig abgeworfen werden. Vorteilhaft weisen die einzelnen Antennenelemente einen Aufrichtmechanismus auf. Zusätzlich oder alternativ können die Einzelantennenelemente auch hinsichtlich all ihrer Funktionen wie senden, empfangen und vermessen omnidirektional ausgelegt sein. Die Referenzstationen des Vermessungssystems sollten auch hier in ausreichender Höhe über dem Boden beispielsweise an Ballonen angeordnet sein, um die erforderliche Genauigkeit in der Positionsbestimmung und Lagebestimmung realisieren zu können.

[0111] Die Einzelantennenelemente können über ein Leitungsnetz mit einer zentralen Stromversorgung gekoppelt sein. Alternativ können die Einzelantennenelemente auch mit jeweils autarken eigenen Stromversorgungssystemen, beispielsweise kleinen Photovoltaikelementen, ausgestattet sein.

[0112] Die Einzelantennenelemente können über ein Leitungsnetz zur Kommunikation untereinander und mit einer zentralen Leitstelle verbunden sein. Alternativ können die Einzelantennenelemente auch mit einer geeigneten Sende-/Empfangseinheit ausgestattet sein und ein geeignetes Netzwerk bilden, über das die Sende- und Empfangssignale und alle weiteren Steuer- und Kontrollsignale kommuniziert werden.

[0113] Die Erfindung kann zumindest in Teilaspekten prinzipiell auch auf segmentierte oder segmentweise aktiv korrigierbare optische Antennen, beispielsweise Paraboloidspiegel, übertragen werden, indem die Segmente der optischen Antenne, beispielsweise des Paraboloidspiegels, vermessen werden. Danach kann statt der Phasenlageneinstellung eine dem Stand der Technik entsprechende aktive Formkorrektur durch Aktuatoren durchgeführt werden. Dieser Ansatz würde nur einen Teil der Erfindung umsetzen und als weiteren Teil Aktuatorik erfordern.

[0114] Es ist sinnvoll und möglich, auf einem biegeschlaffen Träger wie einer aufgespannten Membran gleichzeitig sowohl eine erfindungsgemäße Richtantenne als auch Photovoltaik, insbesondere ausgeführt als Dünnschichtphotovoltaik, zur Nutzung der Membran als Solargenerator unterzubringen. Die erforderliche Fläche der Membran setzt sich dabei zusammen aus dem Flächenbedarf für Photovoltaik plus dem Flächenbedarf für die Summe der Einzelantennenelemente. Bei der Bestimmung der Einzelflächen ist dabei zu berücksichtigen, wie dabei die Hauptarbeitsrichtung der Richtantenne relativ zur Hauptrichtung, unter der die Sonne einfällt, vorausgesetzt, dass dies nicht die optimale, d.h. senkrechte Einfallrichtung wäre, orientiert ist. Die Ausrichtung der Membran wäre dann ein Kompromiss zwischen beiden. Die Bemessung der Flächengröße insgesamt und der Aufteilung der Flächen untereinander sind aus diesem Kompromiss abzuleiten. Eine solche Anordnung ist vorteilhaft für solche Anwendungen, in denen eine feste Beziehung zwischen den beiden Richtungen besteht, sodass dann beispielsweise für ein Raumfahrzeug nur eine Membran aufzuspannen ist. Beispiele für eine solche Anwendung sind beispielsweise ein Radarsatellit auf einem Orbit, der auf der Tag-Nacht-Grenze liegt (typischer Radarsatelliten-Orbit), oder eine Sonde im äußeren Sonnensystem, die Erde und Sonne unter einem recht kleinen Winkel sieht, wie beispielsweise vom Jupiter aus oder weiter entfernt. Dabei könnte diese Anwendung auch so ausgeführt sein, dass die Photovoltaik auf der einen Seite und die Richtantenne auf der anderen Seite der Membran, also auf Vorder- und Rückseite der Membran, angeordnet sind. In dem Fall ist die Flächenausnutzung besser. Es muss dazu allerdings möglich sein, eine Orientierung der Membran zu finden derart, dass die beispielsweise nicht optimal senkrechte Einfallrichtung des Sonnenlichts und die Hauptarbeitsrichtung der Antenne in entgegengesetzten Hemisphären angeordnet sein können und die relative Orientierung weitgehend unverändert bleibt. Dies ist beispielsweise auf Orbits entlang der Tag-Nacht-Grenze gegeben.

[0115] Es ist darüber hinaus möglich und sinnvoll, Richtantennen der beschriebenen Art direkt auf der Außenhaut eines Flugzeugs anzuordnen, wobei über das beschriebene Vermessungs- und Phaseneinstellverfahren in diesem Fall die aeroelastischen Vibrationen und lastabhängigen Verformungen der i.d.R. tragenden Außenhülle vermessen und durch Einstellung der Phasenlage im Sende-/Empfangsfall berücksichtigt werden. Denkbare Anwendungen für eine solche Konstellation sind Radarsysteme für beispielsweise Wetter-, Navigations- und Bodenvermessung, insbesondere

mit mehreren quasi-simultanen oder schnell zu schwenkenden Arbeitsrichtungen, Kommunikationssysteme insbesondere mit energieoptimierter Abstrahlung, wie beispielsweise "fliegende Mobilfunkmasten" einschließlich Ballon- oder Zeppelin-artigen Lösungen, Flugzeug-Satellit-Verbindung und Navigationssysteme, beispielsweise für den gerichteten Empfang von Navigationssatelliten oder entfernten Funkfeuern. Die Größe der Oberflächen von Verkehrsflugzeugen

ermöglicht auch Anwendungen bei relativ niedrigen Frequenzen im oberen HF- und VHF-Bereich.

[0116] Weitere Vorteile, Besonderheiten und zweckmäßige Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen und der nachfolgenden Darstellung bevorzugter Ausführungsbeispiele anhand der Abbildungen.

[0117] Es zeigen

Fig. 1 schematisch eine Richtantenne;

Fig. 2 schematisch einen Ausschnitt aus einer erfindungsgemäßen Richtantenne;

Fig. 3 schematisch, dass aus dem Vermessungssystem einerseits die Kenntnis der Positionen der Referenzknoten und andererseits die Kenntnis der Positionen der Einzelantennenelemente resultieren;

Fig. 4 schematisch ein Beispiel eines Sendevorgangs;

Fig. 5 schematisch das kohärente und in konstruktiver Interferenz miteinander erfolgende Abstrahlen.

[0118] Fig. 1 zeigt schematisch eine Richtantenne 100. Eine Mehrzahl von Einzelantennenelementen Φ zum Empfang von einem Ziel ausgestrahlter elektromagnetischer Signale SIG und/oder zur Abstrahlung elektromagnetischer Signale SIG zu einem Ziel ist auf einem biegeschlaffen Träger 200 angeordnet. Der biegeschlaffe Träger 200 ist quasi-eben, d.h. grob näherungsweise eben. Die Mehrzahl von Einzelantennenelementen Φ ist sowohl hinsichtlich ihrer Position als auch ihrer Ausrichtung weitgehend regellos angeordnet. Die Richtantenne 100 dieses Ausführungsbeispiels weist ein Vermessungssystem (nicht gezeigt) mit vier Referenzknoten R_1, R_2, R_3, R_4 und ein unter dem biegeschlaffen Träger 200 angeordnetes Mastsystem 300 zum Aufspannen des biegeschlaffen Trägers 200 auf, wobei die vier Referenzknoten R_1, R_2, R_3, R_4 jeweils auf einer Ecke eines - gedachten - Polyeders verteilt sind.

[0119] Fig. 2 zeigt schematisch einen Ausschnitt aus einer erfindungsgemäßen Richtantenne 100. Die Figur illustriert das Vermessungssystem mit zum Beispiel vier Referenzknoten R_1, R_2, R_3, R_4 und einem (nicht dargestellten) Navigationssystem und illustriert den Zusammenhang der Zielrichtung, definiert über den Raumwinkel θ, ϕ der Senderichtung zu den Referenzknoten R_1, R_2, R_3, R_4 zu den Positionen und Ausrichtungen der Einzelantennenelemente Φ . Das übergeordnet wirkende Vermessungssystem schafft die Anbindung an die "äußere Geometrie", also an die Zielrichtung, definiert über den Raumwinkel θ, ϕ .

[0120] Fig. 3 illustriert, dass aus dem Vermessungssystem einerseits die Kenntnis der Positionen der Referenzknoten R_1, R_2, R_3, R_4 und andererseits die Kenntnis der Positionen der Einzelantennenelemente Φ (jeweils direkt in einem externen Koordinatensystem oder zunächst in einem lokalem Koordinatensystem und erst nach Transformation im übergeordneten Koordinatensystem) resultieren. Das können hinsichtlich des Verfahrens getrennte Aspekte oder in einem Schritt bestimmte Aspekte sein.

[0121] Je nach Ausführungsform werden die Referenzknoten R_1, R_2, R_3, R_4 entweder eher seltener vermessen, wenn diese im Wesentlichen steif verbunden sind. Die Einzelantennenelemente Φ auf dem biegeschlaffen Träger 200 werden häufiger, auch beispielsweise in Echtzeit vermessen. Insbesondere wenn auch die Anordnung der Referenzknoten R_1, R_2, R_3, R_4 wenig steif, auch bis zu biegeschlaff, ist, werden die Einzelantennenelemente Φ als auch die Referenzknoten R_1, R_2, R_3, R_4 in Echtzeit vermessen.

[0122] Fig. 4 zeigt schematisch am Beispiel eines Sendevorgangs, dass Daten (DAT) auf Grundlage der Kenntnis der Senderichtung (θ, ϕ) und der Kenntnis der Positionen und Ausrichtungen der Einzelantennenelemente (Φ) relativ zu einem übergeordneten, externen Koordinatensystem mit den Raumkoordinaten x, y, z in Signale (SIG) umgerechnet werden können, die mit der für die Position und Ausrichtung (POS) des jeweiligen Einzelantennenelements (Φ) gültigen Phasenlage beaufschlagt sind und somit eine glatte Wellenfront in Richtung der Senderichtung (θ, ϕ) bilden.

[0123] Hier wird am Beispiel des obersten in der Figur dargestellten Einzelantennenelements (Φ) auch klar, dass es sinnvoll ist, dieses abzuschalten, weil es zu weit nach außen zeigt und zu wenig oder sogar störend zum Sendevorgang beiträgt.

[0124] Fig. 5 zeigt schematisch das kohärente und in konstruktiver Interferenz miteinander erfolgende Abstrahlen. Die Abbildung zeigt insbesondere, dass zwischen den Einzelantennenelementen Φ auch in Abstrahlrichtung größere Abstände $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3, \Delta\varphi_4$, als die Trägerwellenlänge λ auftreten können und dass diese lagerichtig durch den festen Bezug zwischen Geometrie und Phasenlageneinstellung berücksichtigt werden.

[0125] Das erfindungsgemäße Verfahren wird aufgrund der Tatsache, dass die Positionen der Einzelantennenelemente Φ mit dem Vermessungssystem in einem weit gefassten zulässigen Driftvolumen (angedeutet durch die Einzel-

antennenelemente Φ auf stark welligem biegeschlaffem Träger 200) auch über ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge λ hinweg verschoben sein können, ohne dass dies die Wirksamkeit der Richtantenne 100 und des Verfahrens beeinträchtigt. Die korrekte Phasenlage wird durch das Verfahren sichergestellt, solange die Einzelantennenelemente Φ nicht außerhalb der die geforderte Positionsbestimmungsgenauigkeit ermöglichenden nutzbaren Reichweite des Vermessungssystems, also des zulässigen Driftvolumens, verdriftet sind.

[0126] Aufgrund dieser Eigenschaft ist es möglich, mit der erfindungsgemäßen Richtantenne 100 insbesondere auch sehr breitbandige, das heißt sehr stark modulierte Signale in gleichmäßig hoher und von der Modulationstiefe unabhängiger Qualitätstreue auszusenden, da durch die Positionsbestimmung der einzelnen Einzelantennenelemente Φ in einer λ/n -Genauigkeit das Auftreten von unbeabsichtigten oder unbemerkten Phasenverschiebungen um ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge λ prinzipiell ausgeschlossen ist. Dadurch ist eine vollständig phasentreue konstruktive Überlagerung der ausgesandten oder empfangenen Signale SIG möglich, und diese phasentreue konstruktive Überlagerung bleibt auch bei großen, ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge λ als Phasenlagenunterschied verursachenden elektronischen Schwenkwinkeln der Antennenkeule erhalten.

[0127] Ein wesentliches Merkmal der erfindungsgemäßen Richtantenne als auch des erfindungsgemäßen Richtantennensystems als auch des zugehörigen Verfahrens zum Betrieb derselben besteht darin, dass der komplette Zyklus von im Sendefall Vermessung der Einzelantennenelemente plus Phasenlagenbestimmung plus Phasenlageneinstellung plus Senden in der Summe so schnell durchführbar ist, dass die erforderliche λ/n -Genauigkeit der relativen Positionen der Einzelantennenelemente Φ zueinander gegeben ist, denn nur dann sind phasenlagenrichtige Sendung beziehungsweise Empfang in einer großen, geforderten λ/n -Genauigkeit möglich. Die erforderliche λ/n -Genauigkeit ist dann gegeben, wenn die Ungenauigkeit der Positionsbestimmung, die durch ein während der Dauer des genannten Zyklus aufgetretenes - und erfindungsgemäß ausdrücklich erlaubtes - Verdriften verursacht ist plus sämtliche im Vermessungsverfahren selbst enthaltenen Ungenauigkeiten in Summe die erforderliche λ/n -Genauigkeit nicht überschreiten. Mit anderen Worten muss die Geschwindigkeit, mit der das Verfahren durchführbar ist, schneller sein als ein vorbestimmter Schwellwert, der von der Schnelligkeit der währenddessen stattfindenden Driftbewegung des die Einzelantennenelemente Φ tragenden biegeschlaffen Trägers 200 abhängt. Sinngemäß dasselbe gilt für den Empfangsvorgang, wobei die Situation dort insofern anders ist, als dass die Phasenlagenbestimmung und Phasenlageneinstellung als auch die dann folgende Rekonstruktion des Signals SIG nach dem eigentlichen Empfang des Signals SIG und damit auch sozusagen "Off-line" stattfinden können. Die λ/n -genaue Positionskenntnis muss für den Zeitpunkt des Empfangs erfüllt sein. Zwischen der Vermessung der Einzelantennenelemente Φ und dem Empfang muss kein weiterer Verfahrensschritt erfolgen. Die Zeit, die zwischen Vermessung und Empfang verstreicht, ist kürzer als im Sendefall, sodass die Anforderung hinsichtlich der Geschwindigkeit des Verfahrens hier entspannter ist als im Sendefall.

[0128] Man könnte auch sagen, dass im Sendefall die Vermessung, Phasenlagenbestimmung und Phasenlageneinstellung bzw. im Empfangsfall die Vermessung sozusagen in Echtzeit erfolgen. Der Begriff "Echtzeit" ist dabei in Relation zur möglichen Driftgeschwindigkeit der Referenzstationen untereinander sowie der möglichen Driftgeschwindigkeit des biegeschlaffen Trägers 200 beziehungsweise der Einzelantennenelemente Φ auf dem biegeschlaffen Träger 200 zu sehen: Die Bestimmung der Positionen der Referenzknoten R1, R2, R3, R4, Einzelantennenelemente Φ oder allgemein von Referenzstationen muss nur sehr viel schneller sein als diese Driftgeschwindigkeiten.

[0129] Die hier gezeigten Ausführungsformen stellen nur Beispiele für die vorliegende Erfindung dar und dürfen daher nicht einschränkend verstanden werden. Alternative durch den Fachmann in Erwägung gezogene Ausführungsformen sind gleichermaßen vom Schutzbereich der vorliegenden Erfindung umfasst.

Bezugszeichenliste:

[0130]

100	Richtantenne
200	biegeschlaffer Träger
300	Mastsystem
B	Bandbreite
DAT	Daten
R ₁	Referenzknoten 1
R ₂	Referenzknoten 2
R ₃	Referenzknoten 3
R ₄	Referenzknoten 4
n	Bruchteil
SIG	Signale
λ	Wellenlänge
Φ	Einzelantennenelement

θ, ϕ Raumwinkel der Senderichtung
 $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3, \Delta\varphi_4$ Abstände der Einzelantennenelemente

5 Patentansprüche

1. Richtantenne (100), aufweisend eine Mehrzahl von Einzelantennenelementen (Φ), zum Empfang von einem Ziel ausgestrahlter elektromagnetischer Signale (SIG) und/oder zur Abstrahlung elektromagnetischer Signale (SIG) zu einem Ziel, wobei die elektromagnetischen Signale (SIG) eine Trägerwellenlänge (λ) und eine Bandbreite (B) aufweisen,
dadurch gekennzeichnet,

dass die einzelnen Einzelantennenelemente (Φ) auf einem biegeschlaffen Träger (200) aufgebracht sind, wobei der biegeschlaffe Träger (200) quasi-eben ist,

wobei alle Einzelantennenelemente (Φ) derart auf dem biegeschlaffen Träger (200) aufgebracht sind, dass, sofern der biegeschlaffe Träger (200) im Wesentlichen in Zielrichtung ausgerichtet ist, eine wesentliche Anzahl von Einzelantennenelementen (Φ) eine freie Abstrahl- beziehungsweise Empfangsrichtung zum beziehungsweise vom Ziel hat,

wobei die Richtantenne (100) weiterhin ein Vermessungssystem aufweist, mit dem die Position und/oder Ausrichtung aller Einzelantennenelemente (Φ) relativ zur Zielrichtung bestimmbar ist,

wobei die Genauigkeit der Positionsbestimmung der Einzelantennenelemente (Φ) relativ zueinander mindestens genauso oder besser ist als ein vorgegebener Bruchteil (n) der Trägerwellenlänge (λ),

und wobei die Richtantenne (100) weiterhin eine Phasenlagenbestimmungseinheit aufweist, mit der die in jedem Einzelantennenelement (Φ) für die Abstrahlung des Sendesignals (SIG) beziehungsweise die Rekonstruktion des empfangenen Signals (SIG) erforderliche Phasenlage des Einzelsignals aus den bestimmten Positionen und Ausrichtungen der Einzelantennenelemente (Φ) und der gewünschten Abstrahlrichtung beziehungsweise Empfangsrichtung bestimmbar ist,

und wobei die Richtantenne (100) weiterhin eine Phasenlageneinstellungseinheit aufweist, mit der die zuvor bestimmten erforderlichen Phasenlagen der Einzelsignale der Einzelantennenelemente (Φ) für den Sendebeziehungsweise Empfangsvorgang jeweils einstellbar sind,

und wobei die Richtantenne (100) im Falle einer Empfangsantenne weiterhin eine Vorrichtung aufweist, mit der bezüglich des Empfangsvorgangs aus den empfangenen Einzelsignalen mit der derart eingestellten jeweiligen Phasenlage das empfangene Signal (SIG) rekonstruierbar ist.

2. Richtantenne (100) gemäß Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass der biegeschlaffe Träger (200) ausrichtbar ist.

3. Richtantenne (100) gemäß einem der Ansprüche 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet,
dass das Vermessungssystem ein lokal wirkendes und ein übergeordnet wirkendes Vermessungssystem aufweist, wobei mit dem lokal wirkenden Vermessungssystem lokale Positionen und/oder Ausrichtungen bestimmbar und mit dem übergeordnet wirkenden Vermessungssystem der Bezug zwischen den lokalen Positionen und/oder Ausrichtungen der Einzelantennenelemente (Φ) und der Zielrichtung herstellbar ist.

4. Richtantenne (100) gemäß einem der vorherigen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass einzelne Einzelantennenelemente (Φ) abschaltbar sind.

5. Richtantenne (100) gemäß einem der vorherigen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass der biegeschlaffe Träger (200) elektrisch abschirmend und damit gleichzeitig elektromagnetische Wellen reflektierend ist.

6. Richtantenne (100) gemäß Anspruch 5,
dadurch gekennzeichnet,

dass der biegeschlaffe Träger (200) der Richtantenne (100) eine Vorder- und eine Rückseite aufweist und auf

jeder der beiden Seiten ein eigenes Sende- und/oder Empfangssystem untergebracht ist, derart, dass auf einer ersten Seite empfangene Signale (SIG) auf der zweiten Seite abstrahlbar bzw. auf der zweiten Seite empfangene Signale (SIG) auf der ersten Seite abstrahlbar sind, wobei durch elektromagnetische Abschirmung durch den biegeschlaffen Träger (200) sichergestellt ist, dass keine störenden Interferenzen oder andere unerwünschte Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Sende-/Empfangssystemen auftreten.

7. Richtantenne (100) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4,

dadurch gekennzeichnet,

dass der biegeschlaffe Träger (200) nicht elektrisch abschirmend und damit für elektromagnetische Wellen transparent ist.

8. Richtantenne (100) gemäß Anspruch 7,

dadurch gekennzeichnet,

dass der biegeschlaffe Träger (200) der Richtantenne (100) eine Vorder- und eine Rückseite aufweist und auf jeder der beiden Seiten ein eigenes Sende- und/oder Empfangssystem untergebracht ist, derart, dass auf einer ersten Seite empfangene Signale (SIG) auf der zweiten Seite abstrahlbar bzw. auf der zweiten Seite empfangene Signale (SIG) auf der ersten Seite abstrahlbar sind, wobei durch Wahl geeignet separierter Frequenzen sichergestellt ist, dass keine störenden Interferenzen oder andere unerwünschte Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Sende-/Empfangssystemen auftreten.

9. Richtantenne (100) gemäß einem der vorherigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass das Vermessungssystem mindestens einen Referenzknoten (R_1, R_2, R_3, R_4), bevorzugt mindestens drei nicht auf einer Geraden liegende Referenzknoten (R_1, R_2, R_3, R_4) und besonders bevorzugt mindestens vier Referenzknoten (R_1, R_2, R_3, R_4) aufweist, wobei die mindestens vier Referenzknoten (R_1, R_2, R_3, R_4) jeweils auf einer Ecke eines Polyeders verteilt sind, wobei der Polyeder mindestens so viele Ecken aufweist, wie die Richtantenne Referenzknoten (R_1, R_2, R_3, R_4) aufweist.

10. Richtantenne (100) gemäß Anspruch 9,

dadurch gekennzeichnet,

dass der oder die Referenzknoten (R_1, R_2, R_3, R_4) entweder auf einer derart steifen und formstabilen Tragstruktur relativ zu den übrigen Elementen des übergeordnet wirkenden Vermessungssystems angeordnet ist bzw. sind, sodass keine Neuvermessung der Referenzknotenpositionen während des Betriebes notwendig ist zur Erreichung der erforderlichen λ/n -Genauigkeit oder aber, sofern die Tragstruktur nicht ausreichend formstabil ist, sodass eine Neuvermessung der Referenzknoten (R_1, R_2, R_3, R_4) im Verlauf des Betriebs im Rahmen des Betriebsverfahrens erforderlich ist, um eine vorgegebene Genauigkeit als vorgegebener Bruchteil $1/n$ der Trägerwellenlänge λ zu erreichen und dass das Vermessungssystem der Richtantenne (100) zu diesem Zweck eine Selbstvermessungsvorrichtung für die Referenzknoten (R_1, R_2, R_3, R_4) aufweist.

11. Richtantennensystem,

dadurch gekennzeichnet,

dass das Richtantennensystem eine Mehrzahl von Richtantennen (100) gemäß einem der vorherigen Ansprüche aufweist, die zusammenwirken.

12. Verfahren zum Betreiben einer Richtantenne (100) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 10 oder eines Richtantennensystems gemäß Anspruch 11,

gekennzeichnet durch die Schritte

- Prüfung der Ausrichtung und gegebenenfalls Grobausrichtung der Richtantenne (100) bzw. aller oder einzelner Richtantennen (100) des Richtantennensystems in Richtung der Zielrichtung;
- Bestimmung der Positionen und/oder Ausrichtungen der Einzelantennenelemente (Φ) der Richtantenne (100) bzw. der Einzelantennenelemente (Φ) der Richtantennen (100) des Richtantennensystems in Bezug zur gewünschten Zielrichtung;
- Gegebenenfalls nochmalige mechanische Grobausrichtung gemäß Schritt a) und darauffolgend nochmalige Positions- und/oder Ausrichtungsbestimmung gemäß Punkt b);
- Aus der zuvor durchgeführten Positions- und/oder Ausrichtungsbestimmung der Einzelantennenelemente

(Φ) der Richtantenne (100) beziehungsweise der Einzelantennenelemente (Φ) der Richtantennen (100) des Richtantennensystems und aus der gewünschten Zielrichtung Bestimmung der Phasenlage der Einzelsignale in den Einzelantennenelementen (Φ), die für die Abstrahlung des Sendesignals (SIG) beziehungsweise für die Rekonstruktion des empfangenen Signals (SIG) aus den in den Einzelantennenelementen (Φ) empfangenen

Einzelsignalen erforderlich ist, unter Verwendung der Phasenlagenbestimmungseinheit;
e. Einstellung der zuvor bestimmten Phasenlagen für die einzelnen Einzelantennenelemente (Φ) an deren jeweiligen zu sendenden Einzelsignalen beziehungsweise an deren zum zu rekonstruierenden Empfangssignal beitragenden jeweiligen empfangenen Einzelsignalen mithilfe der Phasenlageneinstellungseinheit;

f. Senden der mit den zuvor bestimmten Phasenlagen versehenen Einzelsignale mit den jeweiligen Einzelantennenelementen (Φ) beziehungsweise Rekonstruktion des empfangenen Signals (SIG) aus den in den einzelnen Einzelantennenelementen (Φ) empfangenen und mit den zuvor bestimmten Phasenlagen versehenen Einzelsignalen.

13. Verfahren gemäß Anspruch 12 ,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Signalqualität des in der Richtantenne (100) empfangenen Signals (SIG) oder des gesendeten und auf der Gegenstation empfangenen Signals (SIG) optimiert wird, dadurch, dass die empfangenen Signale (SIG) als Beobachtungsdaten in einem mathematischen Optimierungsverfahren verwendet werden, mit dem die in das Verfahren eingebrachten Positionen und Ausrichtungen der Einzelantennenelemente (Φ) oder die im Verfahren verwendeten Phasenlagenkorrekturen in den Einzelantennenelementen (Φ) optimiert werden.

14. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 12 oder 13,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Bestimmung der Positionen und/oder Ausrichtungen der Einzelantennenelemente (Φ) der Richtantenne (100) beziehungsweise der Richtantennen (100) des Richtantennensystems relativ zum Ziel folgende Aktionen umfasst, wobei die Aktionen in beliebiger Reihenfolge durchführbar sind:

- Optional Bestimmung der Positionen der Referenzknoten (R_1, R_2, R_3, R_4) der Richtantenne (100) beziehungsweise der Referenzknoten (R_1, R_2, R_3, R_4) der Richtantennen (100) des Richtantennensystems relativ zueinander und relativ zu den anderen Elementen des übergeordnet wirkenden Vermessungssystems mithilfe des lokal wirkenden Vermessungssystems;

- Bestimmung der Positionen und/oder Ausrichtungen der Einzelantennenelemente (Φ) relativ zu den Positionen der Referenzknoten (R_1, R_2, R_3, R_4) mithilfe des lokal wirkenden Vermessungssystems;

- Bestimmung der Zielrichtung relativ zu den Positionen der Referenzknoten (R_1, R_2, R_3, R_4) mithilfe des übergeordnet wirkenden Teils des Vermessungssystems.

15. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 12 bis 14,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Bestimmung der Position der Referenzknoten (R_1, R_2, R_3, R_4) schneller erfolgt als ein vorbestimmter Schwellwert, der von der Geschwindigkeit der währenddessen erfolgenden Deformationsbewegung der die Referenzknoten (R_1, R_2, R_3, R_4) tragenden nicht ideal steifen Trägerstruktur abhängt.

16. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 13 bis 15,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Bestimmung der Positionen und Ausrichtungen aller Einzelantennenelemente (Φ) und die Bestimmung der erforderlichen Phasenlagen für jedes Einzelantennenelement (Φ) sowie das darauf aufbauende Senden beziehungsweise Empfangen von Einzelsignalen schneller erfolgt als ein vorbestimmter Schwellwert, der von der Geschwindigkeit der währenddessen erfolgenden Driftbewegung der Einzelantennenelemente (Φ) auf dem biegeschlaffen Träger (200) als auch der die Referenzknoten (R_1, R_2, R_3, R_4) tragenden nicht ideal steifen Trägerstruktur abhängt.

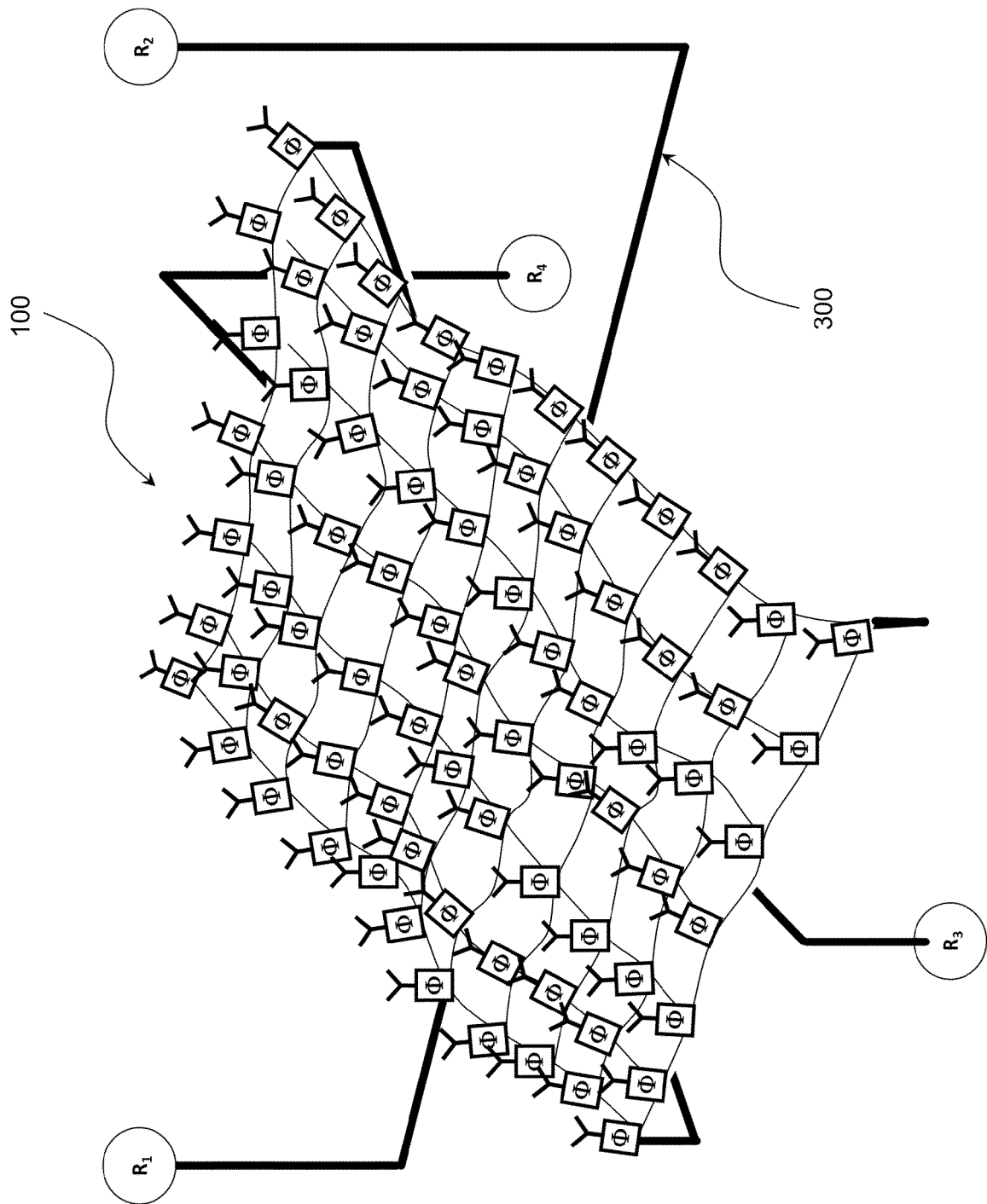


Fig. 1

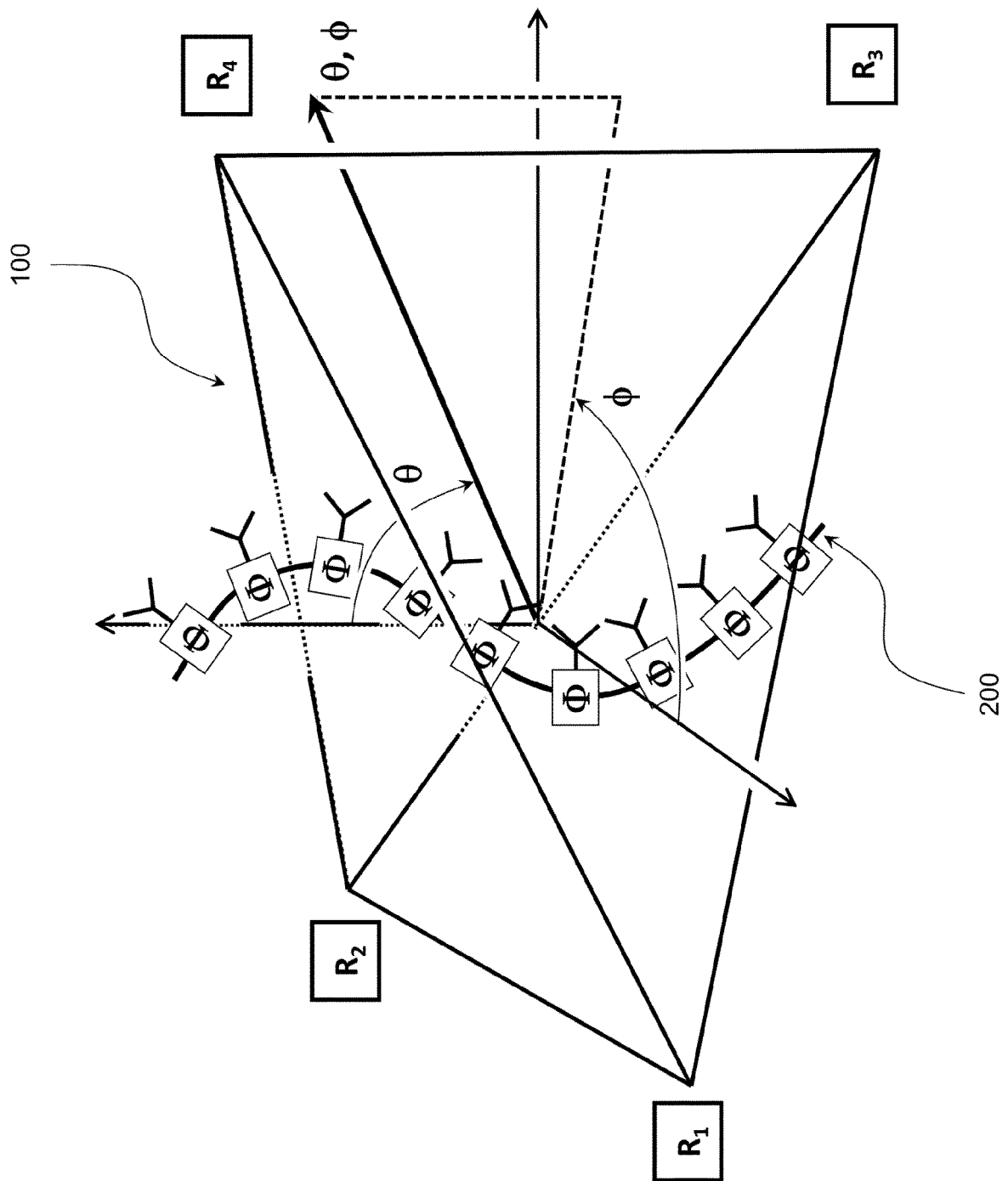


Fig. 2

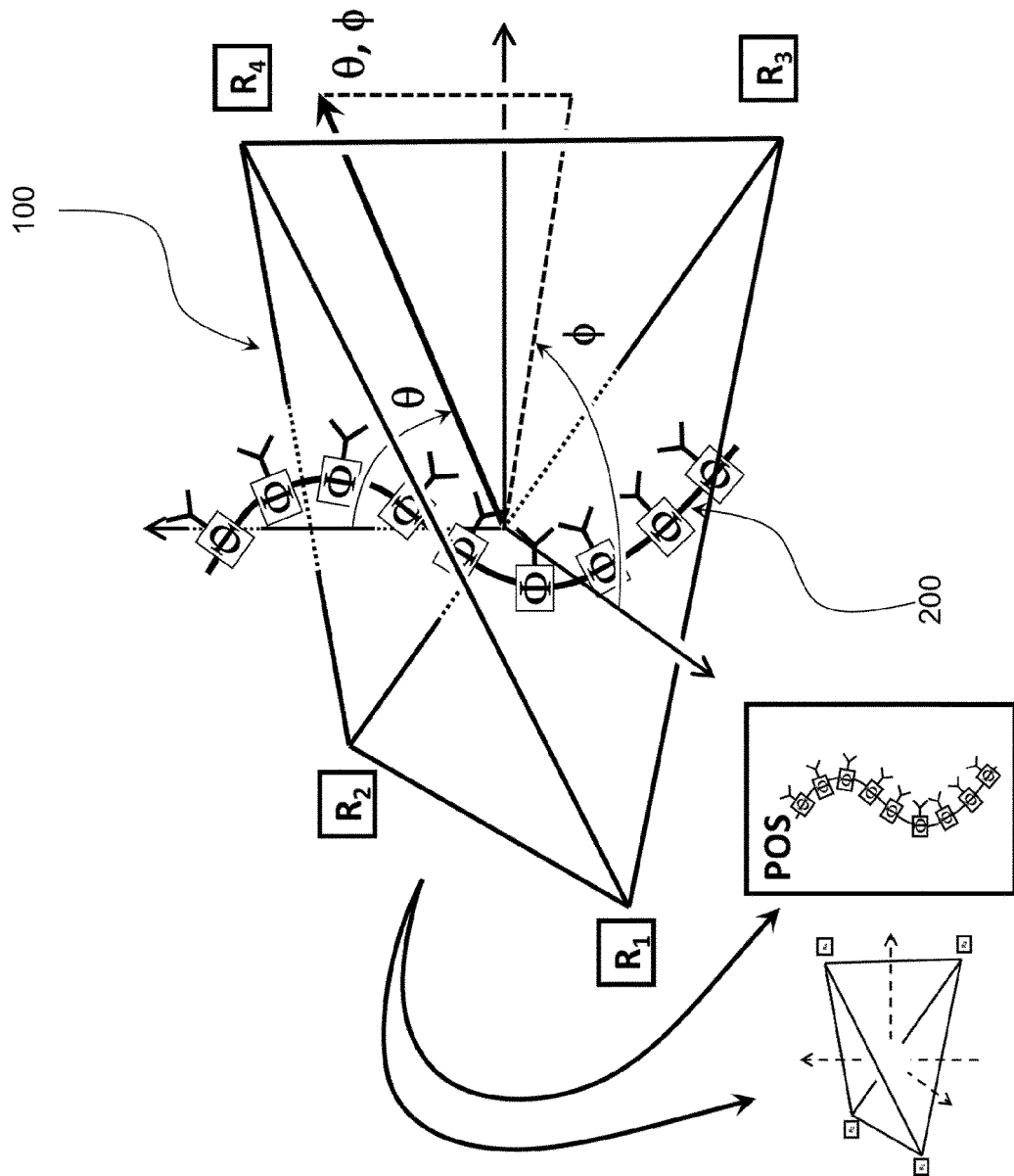


Fig. 3

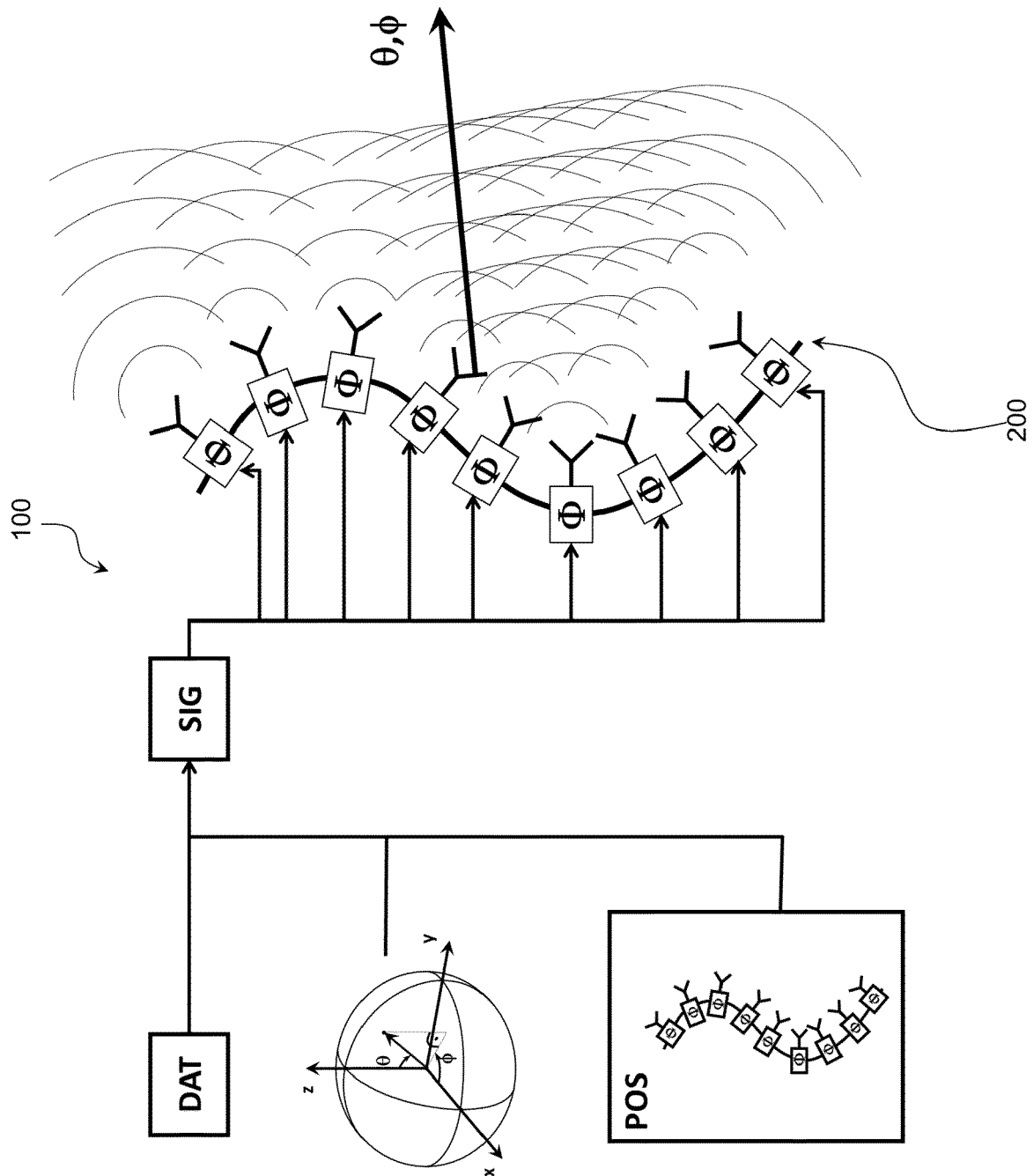


Fig. 4

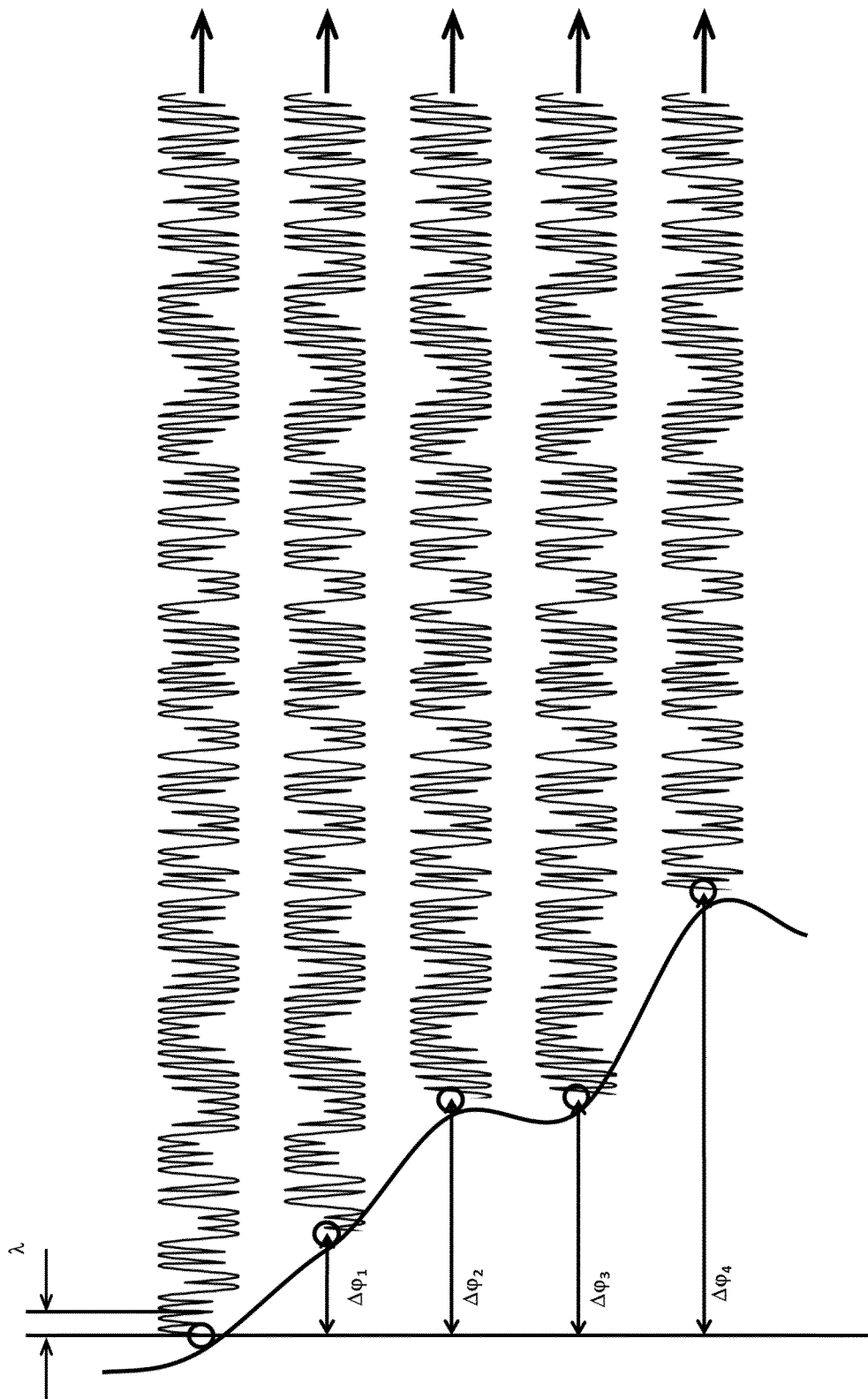


Fig. 5



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 23 19 6059

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

1

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	WO 2017/132539 A1 (MOTION ENGINE INC [CA]; BOYSEL ROBERT MARK [CA]) 3. August 2017 (2017-08-03)	1-5, 9-12, 16	INV. H01Q1/00 H01Q3/26 H01Q3/36 H01Q21/06
A	* Seite 10 - Seite 34; Abbildungen 14, 20, 10-13, 2-4 *	6-8, 13-15	
A, D	US 6 333 712 B1 (HAUGSE ERIC DAVID [US] ET AL) 25. Dezember 2001 (2001-12-25) * Spalte 4 - Spalte 8; Abbildungen 1-17 *	1-16	ADD. H01Q1/28 H01Q3/46 H01Q25/00
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
Recherchenort Den Haag			Prüfer Sípal, Vít
Abschlußdatum der Recherche 23. Januar 2024			
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument			

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.****EP 23 19 6059**

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentedokumente angegeben.
Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

23-01-2024

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patentedokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
	WO 2017132539 A1	03-08-2017	KEINE	
15	US 6333712 B1	25-12-2001	KEINE	
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- US 8184042 B2 [0018]
- US 6333712 B1 [0027]
- US 6954173 B2 [0028]
- US 6703970 B2 [0029]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **J. RUZE.** Antenna Tolerance Theory-A Review. *Proceedings of the IEEE*, April 1966, vol. 54 (4 [0013]
- **LESUEUR et al.** *Optical sensor for the management of Radar antenna distortion*, 2009 [0024]
- **WIT et al.** *Concept for measuring and compensating array deformation*, 2007 [0025]
- **YANG BO ; LIU NING ; ZHANG ZHAOLIN ; CHANG CUIYAN.** Self-calibration of Spaceborne Membrane Phased Array. *SPACOMM 2015 The Seventh International Conference on Advances in Satellite and Space Communications, Barcelona, Spain*, 2015 [0026]