



(11)

EP 4 235 953 A1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
30.08.2023 Patentblatt 2023/35

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
H01P 1/39 (2006.01) H05H 7/22 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **22159014.4**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
H01P 1/39; H05H 7/02; H05H 2007/027

(22) Anmeldetag: **25.02.2022**

(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 MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

(71) Anmelder: **Siemens Healthcare GmbH**
91052 Erlangen (DE)

(72) Erfinder:
• **Müller, Sven**
99198 Urbich (DE)
• **Koschmieder, Martin**
07407 Uhlstädt-Kirchhasel (DE)
• **Möller, Marvin**
07751 Jena (DE)
• **Noak, Claudia**
07407 Uhlstädt-Kirchhasel (DE)
• **Setzer, Stefan**
90542 Eckental (DE)
• **Willing, Stefan**
07407 Rudolstadt (DE)

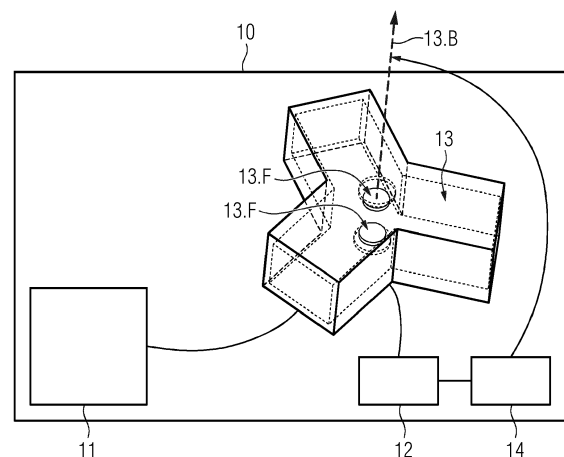
(54) HOCHFREQUENZQUELLE MIT EINEM PHASENSTABILISIERUNGSELEMENT

(57) Die Erfindung betrifft eine Hochfrequenzquelle für ein Linearbeschleunigersystem, das Linearbeschleunigersystem, ein Verfahren zum Betreiben einer Hochfrequenzquelle und ein zugehöriges Computerprogrammprodukt.

Die erfindungsgemäße Hochfrequenzquelle für ein Linearbeschleunigersystem weist

- einen Mikrowellengenerator zum Generieren von Mikrowellen,
- eine Regeleinheit und
- einen Zirkulator auf, welcher Ferrite zur Isolation des Mikrowellengenerators gegen zurückgestreute Mikrowellen durch Beeinflussung der Phasenlage der Mikrowellen in Abhängigkeit eines Magnetfelds aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass der Zirkulator ein elektrisches Phasenstabilisierungselement aufweist, wobei die Regeleinheit für einen Empfang einer magnetischen Permeabilität des Zirkulators beschreibenden Messgröße und für ein derartiges Einstellen eines Stroms und/oder einer Spannung des elektrischen Phasenstabilisierungselements zur Beeinflussung des Magnetfelds in Abhängigkeit von der empfangenen Messgröße ausgebildet ist, dass ein Amplitudenunterschied zwischen den generierten Mikrowellen und den zurückgestreuten Mikrowellen maximal ist.

FIG 1



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Hochfrequenzquelle für ein Linearbeschleunigersystem, das Linearbeschleunigersystem, ein Verfahren zum Betreiben einer Hochfrequenzquelle und ein zugehöriges Computerprogrammprodukt.

[0002] Hochfrequenzquellen werden regelmäßig dazu eingesetzt, um hochfrequente Mikrowellen bereitzustellen, welche beispielsweise zur Beschleunigung von geladenen Teilchen, insbesondere Elektronen, in einem herkömmlichen Linearbeschleunigersystem dienen. Eine solche Hochfrequenzquelle für einen Linearbeschleuniger ist beispielsweise aus der DE 10 2012 209 185 A1 bekannt.

[0003] Das Linearbeschleunigersystem stellt je nach Art der Anwendung hochenergetische geladene Teilchen oder MeV-Photonen, insbesondere MeV-Röntgenstrahlung, bereit, wobei letztere typischerweise durch die Wechselwirkung der geladenen Teilchen mit einem Target in der Linearbeschleunigereinheit entstehen. Das Linearbeschleunigersystem wird beispielsweise bei einer Zollkontrolle und/oder einer Werkstoffprüfung verwendet. Grundsätzlich ist auch die Verwendung bei einer Strahlentherapie und/oder einer medizinischen Bildgebung denkbar und bekannt.

[0004] Ein solches Linearbeschleunigersystem umfasst typischerweise zwei von drei Hauptkomponenten, welche herkömmlicherweise in einer Anlage zusammenwirken. Eine erste Hauptkomponente ist die Linearbeschleunigereinheit. Eine weitere Hauptkomponente ist ein Versorgungsmodul, welches zur Bereitstellung und/oder Steuerung und/oder Regelung der für die (anderen) Hauptkomponenten benötigten elektrischen Spannungen und/oder Ströme eingerichtet ist und beispielsweise die Hochfrequenzquelle umfasst. Eine dritte Hauptkomponente ist ein Kühlsystem, beispielsweise "Chiller" genannt.

[0005] Das Kühlsystem dient üblicherweise der Temperaturstabilisierung der Hochfrequenzquelle, insbesondere eines Zirkulators der Hochfrequenzquelle. Temperaturstabilisierung bedeutet insbesondere Temperierung. Das Kühlsystem ist insbesondere ein Temperierungssystem. Das Kühlsystem stellt für die Temperaturstabilisierung insbesondere eine Kühlleistung bzw. Wärmeleistung bereit. Die Temperaturstabilisierung umfasst insbesondere ein Temperieren, also ein Kühlen und/oder ein Aufwärmen. Ohne Temperaturstabilisierung führt eine Temperaturänderung typischerweise zu einer zusätzlichen Phasenverschiebung in den Ferriten des Zirkulators. Die zusätzliche Phasenverschiebung wirkt sich typischerweise nachteilig auf den Grad der Isolation des Mikrowellengenerators gegen zurückgestreute Mikrowellen aus. Die Isolation erfordert typischerweise eine bestimmte Phasenlage der generierten Mikrowellen gegenüber den zurückgestreuten Mikrowellen.

[0006] Ein solches herkömmliches Kühlsystem benötigt regelmäßig rund 1/3 bis 1/2 des Bauraums der Anlage

sowie 1/3 bis 1/2 der verbrauchten elektrischen Leistung der Anlage. Dieser Bedarf an Bauraum und/oder elektrischer Leistung erhöht insgesamt die Anforderungen an die die Anlage aufnehmende Umgebung. Der Betrieb einer herkömmlichen Anlage ist entsprechend anspruchsvoll, insbesondere wenn die Anlage auf einer mobilen Plattform eingesetzt wird. Die mobile Plattform kann beispielsweise Teil eines Lastkraftwagens sein.

[0007] Wenn die die Anlage aufnehmende Umgebung die Anforderungen nicht vollständig erfüllen kann, kann regelmäßig die Anlage nur mit verringerter Strahlperformance betrieben werden. Die verringerte Strahlperformance ermöglicht eine Reduktion der Kühlleistung des Kühlsystems und somit des Bauraum- und/oder elektrischen Leistungsbedarfs. Alternativ oder zusätzlich kann herkömmlicherweise die Anlage, insbesondere das Kühlsystem, dadurch kleiner dimensioniert werden, dass die Anlage einen Teil der Kühlleistung durch eine gemeinsame Nutzung eines weiteren bestehenden Kühlsystems bezieht. Letzteres erfordert allerdings eine vergleichsweise starke Systemintegration und/oder Anbindung an weitere Systeme, was üblicherweise die Komplexität der Anlage erhöht.

[0008] Der Erfindung liegt die Aufgabe zu Grunde, eine Hochfrequenzquelle für ein Linearbeschleunigersystem, das Linearbeschleunigersystem, ein Verfahren zum Betreiben einer Hochfrequenzquelle und ein zugehöriges Computerprogrammprodukt mit einem erhöhten Temperaturarbeitsbereich anzugeben.

[0009] Die Aufgabe wird durch die Merkmale der unabhängigen Ansprüche gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen beschrieben.

[0010] Eine erfindungsgemäße Hochfrequenzquelle für ein Linearbeschleunigersystem weist

- einen Mikrowellengenerator zum Generieren von Mikrowellen,
- eine Regeleinheit und
- einen Zirkulator auf, welcher Ferrite zur Isolation des Mikrowellengenerators gegen zurückgestreute Mikrowellen durch Beeinflussung der Phasenlage der Mikrowellen in Abhängigkeit eines Magnetfelds aufweist,

dadurch gekennzeichnet,
dass der Zirkulator ein elektrisches Phasenstabilisierungselement aufweist,
wobei die Regeleinheit für einen Empfang einer magnetischen Permeabilität des Zirkulators beschreibenden Messgröße und für ein derartiges Einstellen eines Stroms und/oder einer Spannung des elektrischen Phasenstabilisierungselements zur Beeinflussung des Magnetfelds in Abhängigkeit von der empfangenen Messgröße ausgebildet ist,
dass ein Amplitudenunterschied zwischen den generierten Mikrowellen und den zurückgestreuten Mikrowellen maximal ist.

[0011] Ein erfindungsgemäßes Verfahren zum Betreiben der Hochfrequenzquelle weist die folgenden Schritte auf:

- Empfangen der die magnetische Permeabilität des Zirkulators beschreibenden Messgröße in der Regeleinheit,
- Einstellen des Stroms und/oder der Spannung des elektrischen Phasenstabilisierungselements zur Beeinflussung des Magnetfelds in Abhängigkeit von der Messgröße mittels der Regeleinheit derart, dass der Amplitudenunterschied der generierten Mikrowellen und der zurückgestreuten Mikrowellen maximal wird.

[0012] Das Verfahren zum Betreiben der Hochfrequenzquelle umfasst im Wesentlichen eine Steuerung bzw. Regelung der Hochfrequenzquelle.

[0013] Ein Vorteil der Hochfrequenzquelle bzw. des derartigen Betriebs der Hochfrequenzquelle ist, dass die erfindungsgemäße Hochfrequenzquelle vorteilhafterweise wesentlich weniger Bauraum und/oder elektrische Leistung im Vergleich zu einer herkömmlichen Hochfrequenzquelle benötigt. Dieser Vorteil wird beispielsweise dadurch verwirklicht, dass das elektrische Phasenstabilisierungselement in der Hochfrequenzquelle Temperaturschwankungen, welche insbesondere Veränderungen der magnetischen Permeabilität und somit insbesondere der Phasenlage der Mikrowellen nach sich ziehen, aktiv entgegenwirkt.

[0014] Die Hochfrequenzquelle kompensiert vorzugsweise einen teilweisen oder vollständigen Wegfall einer Kühlleistung, welche für die Temperaturstabilisierung der Hochfrequenzquelle typischerweise verwendet werden kann, durch ein aktives Regeln des elektrischen Phasenstabilisierungselements. Die Kompensation umfasst insbesondere ein elektrothermisches und/oder ein elektromagnetisches Kompensieren.

[0015] Der Mikrowellengenerator umfasst insbesondere ein Magnetron oder ein Klystron. An einem Eingang des Mikrowellengenerators liegt typischerweise eine Hochspannung an, welche mittels des Mikrowellengenerators ausgangsseitig in hochfrequente Mikrowellen mit einer von der Hochspannung abhängigen Hochfrequenzleistung überführt wird. Der Mikrowellengenerator erzeugt insbesondere ein elektromagnetisches Wechselfeld im GHz-Bereich, insbesondere zwischen 1 und 10 GHz, vorzugsweise zwischen 2 und 4 GHz, in Form von Mikrowellen. Die generierten Mikrowellen sind insbesondere für die Beschleunigung von geladenen Teilchen geeignet.

[0016] Die generierten Mikrowellen sind definiert als diejenigen Mikrowellen, welche von dem Mikrowellengenerator erzeugt werden. Die generierten Mikrowellen sind insbesondere vorwärtsgerichtete Mikrowellen. Zurückgestreute Mikrowellen sind insbesondere rückwärtsgerichtete Mikrowellen. Die zurückgestreuten Mikrowellen sind insbesondere solche Mikrowellen, welche an ei-

ner Nutzlast des Zirkulators, beispielsweise an dem Linearbeschleunigersystem, und/oder am Zirkulator selbst zurückgestreut werden insbesondere in Abhängigkeit von den generierten Mikrowellen.

[0017] Der Zirkulator weist insbesondere mindestens 3 Tore auf, wobei das erste Tor mit dem Mikrowellengenerator verbindbar ist, wobei das zweite Tor mit einer Nutzlast, insbesondere einer Linearbeschleunigereinheit des Linearbeschleunigersystems, verbindbar ist und wobei das dritte Tor mit einer Last insbesondere zur Absorption zurückgestreuter Mikrowellen verbindbar ist. Ein solcher 3-Tor-Zirkulator weist typischerweise eine Y-Form auf, wobei die Schenkel 120° versetzt angeordnet sind. Grundsätzlich ist es denkbar, dass der Zirkulator ein viertes Tor aufweist, welches beispielsweise mit einem Reflexionsphasenschieber oder einer weiteren Last verbindbar ist. Im Betrieb ist der Zirkulator an dem jeweiligen Tor typischerweise z.B. über einen Hohlleiter verbunden. Die Last und/oder die weitere Last kann insbesondere eine Wasserlast sein.

[0018] Der Zirkulator ist insbesondere ein ferritischer Zirkulator. Der Zirkulator weist die Ferrite auf, welche derart angeordnet und ausgebildet sind, dass die generierten Mikrowellen und die zurückgestreuten Mikrowellen voneinander separiert werden und/oder die zurückgestreuten Mikrowellen nicht an den Mikrowellengenerator zurückgeführt werden. Zur Magnetisierung der Ferrite weist der Zirkulator typischerweise einen weiteren Permanentmagneten auf. Die Ferrite können insbesondere dadurch als Isolator wirken, weil die Ferrite einem Magnetfeld ausgesetzt sind.

[0019] Ein Frequenzbereich der im Zirkulator zu separierenden Mikrowellen ist vorteilhafterweise mittels der Regeleinheit einstellbar. Der Zirkulator ist vorteilhafterweise ein im Wesentlichen temperaturunabhängiger Zirkulator aufgrund des elektrischen Phasenstabilisierungselements. Der Zirkulator der Hochfrequenzquelle weist vorzugsweise einen größeren Temperaturarbeitsbereich auf als ein herkömmlicher Zirkulator, weil das elektrische Phasenstabilisierungselement Temperaturschwankungen ausgleichen kann. Der Temperaturarbeitsbereich des Zirkulators beträgt insbesondere mindestens $\pm 2^\circ\text{C}$, vorzugsweise mindestens $\pm 5^\circ\text{C}$, vorteilhafterweise mindestens $\pm 20^\circ\text{C}$, besonders vorteilhafterweise mindestens $\pm 50^\circ\text{C}$. Die bevorzugte Arbeitstemperatur des Zirkulators beträgt beispielsweise 30°C , 40°C , 60°C oder 80°C und liegt in dem jeweiligen Temperaturarbeitsbereich. Der Temperaturarbeitsbereich von $\pm^\circ\text{C}$ bezieht sich beispielsweise auf die Arbeitstemperatur und nicht zwingend auf 0°C . In dem Temperaturarbeitsbereich kann die Hochfrequenzquelle, insbesondere der Zirkulator, optimal, vorzugsweise ausreichend gut, betrieben werden. Innerhalb des Temperaturarbeitsbereichs, sprich von einer unteren Grenze zu einer oberen Grenze, weisen die den Zirkulator passierenden Mikrowellen vorzugsweise die im Wesentlichen gleiche Phase durch das Regeln mittels des elektrischen Phasenstabilisierungselements auf.

[0020] Die Regeleinheit kann insbesondere eine Recheneinheit sein oder einen Teil einer Recheneinheit bilden. Die Regeleinheit weist insbesondere eine Eingangsschnittstelle für den Empfang der Messgröße auf. Die Messgröße gibt insbesondere einen Betrag der magnetischen Permeabilität wieder. Die Messgröße kann vektorbasiert sein. Die Messgröße kann insbesondere zeitaufgelöst sein. Die Regeleinheit kann insbesondere dazu ausgebildet sein, das Messen mit der Messeinrichtung anzustoßen oder auszulösen. Die Regeleinheit kann das Messen mehrmals auslösen. Das Messen kann getaktet und/oder kontinuierlich erfolgen.

[0021] Die Regeleinheit kann Teil einer Messeinrichtung sein oder mit der Messeinrichtung kabelgebunden oder kabellos verbunden sein. Die Regeleinheit kann die Messgröße insbesondere mittels der Eingangsschnittstelle empfangen, in einer Zwischenspeichereinheit abspeichern und/oder beim Einstellen verarbeiten. Das Verarbeiten erfolgt insbesondere gemäß einer Logik und/oder einem Algorithmus. Das Verarbeiten kann insbesondere gemäß die Logik und/oder den Algorithmus abbildenden Programmcodemitteln erfolgen. Das Verarbeiten kann digital und/oder analog erfolgen. Das Verarbeiten kann insbesondere wiederholt erfolgen. Beim Einstellen des Stroms und/oder der Spannung des elektrischen Phasenstabilisierungselements wird insbesondere die Messgröße verarbeitet, beispielsweise nachdem die Messgröße empfangen wird und/oder in der Zwischenspeichereinheit abgespeichert wird.

[0022] Das Einstellen des Stroms und/oder der Spannung umfasst insbesondere das Verarbeiten der Messgröße und/oder ein Ermitteln eines Regelwerts. Der ermittelte Regelwert kann an einer Ausgangsschnittstelle der Regeleinheit anliegen. Die Regeleinheit kann alternativ oder zusätzlich dazu ausgebildet sein, mittels des ermittelten Regelwerts den Strom und/oder die Spannung an das elektrische Phasenstabilisierungselement anzulegen.

[0023] Das Einstellen des Stroms und/oder der Spannung erfolgt beispielsweise mehrmals, vorzugsweise getaktet und/oder kontinuierlich, insbesondere gemäß der Logik und/oder dem Algorithmus. Das Einstellen bedeutet insbesondere das Lösen eines Optimierungsproblems mit dem Ziel, den Amplitudenunterschied zu maximieren und/oder die Hochfrequenzleistung der zurückgestreuten Mikrowellen zu minimieren. Die Logik und/oder der Algorithmus sind insbesondere darauf ausgerichtet, dass der Amplitudenunterschied maximal ist bzw. wird. In anderen Worten kann das Einstellen mehrmals erfolgen, bis der Amplitudenunterschied maximal ist. Das Einstellen kann zur Folge haben, dass der Amplitudenunterschied im Vergleich zum vorherigen Amplitudenunterschied kleiner wird. Vorteilhafterweise korrigiert die Regeleinheit den kleiner werdenden Amplitudenunterschied mittels des darauffolgenden Einstellens.

[0024] Dass der Amplitudenunterschied maximal ist, bedeutet insbesondere, dass der Zirkulator im Betrieb der Hochfrequenzquelle isolationsfähig ist. In anderen

Worten ist durch das elektrische Phasenstabilisierungselement die Isolationsfähigkeit des Zirkulators im Betrieb gewährleistet. Die Isolationsfähigkeit des Zirkulators hängt insbesondere von dem an den Ferriten bereitgestellten Magnetfeld und der Temperatur der Ferrite ab.

[0025] Dass der Amplitudenunterschied maximal ist, bedeutet insbesondere, dass die von den generierten Mikrowellen übertragene Hochfrequenzleistung wesentlich größer ist als die von den zurückgestreuten Mikrowellen übertragene Hochfrequenzleistung. Vorteilhafterweise liegt eine Durchgangsdämpfung unter 1 dB. Insbesondere liegt die Dämpfung in Rückwärtsrichtung über 20 dB, vorzugsweise über 30 dB. Dass der Amplitudenunterschied maximal ist, bedeutet typischerweise, dass die Hochfrequenzleistung der zurückgestreuten Mikrowellen minimal ist.

[0026] Der Betrag des maximalen Amplitudenunterschieds kann variieren insbesondere in Abhängigkeit des Zeitpunkts der Messung der Messgröße. Die Hochfrequenzquelle stellt beispielsweise die Hochfrequenzleistung in Form der Mikrowellen mit einer bestimmten Pulslänge zeitlich abgrenzbar bereit. Am Pulsanfang ist die Hochfrequenzleistung der zurückgestreuten Mikrowellen typischerweise größer als die Hochfrequenzleistung der zurückgestreuten Mikrowellen im eingeschwungenen Zustand.

[0027] Das Einstellen des Stroms und/oder der Spannung umfasst insbesondere ein Regeln des elektrischen Phasenstabilisierungselements. Das Einstellen bewirkt insbesondere, dass die gemessene Messgröße das Magnetfeld mittels des elektrischen Phasenstabilisierungselements beeinflusst. Das Einstellen ermöglicht insbesondere das Kompensieren einer unerwünschten Permeabilitätsabweichung und somit einer Magnetfeldabweichung. Der eingestellte Strom und/oder die eingestellte Spannung beeinflussen unmittelbar das Magnetfeld an den Ferriten im Zirkulator. Das elektrische Phasenstabilisierungselement kann eine Eingangsschnittstelle für den Empfang des Regelwerts aufweisen.

[0028] Das elektrische Phasenstabilisierungselement ist insbesondere ein Teil des Zirkulators. Das elektrische Phasenstabilisierungselement verbraucht elektrische Leistung in Abhängigkeit von dem eingestellten Strom und/oder der eingestellten Spannung. Das elektrische Phasenstabilisierungselement steht insbesondere in einem direkten physischen Kontakt mit dem Zirkulator. Das elektrische Phasenstabilisierungselement ist mit dem Zirkulator fest verbunden und/oder gekoppelt. Das elektrische Phasenstabilisierungselement erzeugt in Abhängigkeit des eingestellten Stroms und/oder der Spannung insbesondere eine Wirkung in unmittelbarer Nähe zum Zirkulator und/oder zu oder an den Ferriten. Das elektrische Phasenstabilisierungselement beeinflusst das Magnetfeld beispielsweise mittels einer Überlagerung des Magnetfelds mit einem weiteren Magnetfeld und/oder einer Beeinflussung der Permeabilität der Ferrite. Die Beeinflussung des Magnetfelds umfasst insbesondere ein Verändern des Betrags und/oder der Ausrichtung des

Magnetfelds.

[0029] Eine Ausführungsform sieht vor, dass das elektrische Phasenstabilisierungselement zur Beeinflussung des Magnetfelds ein von dem eingestellten Strom und/oder der eingestellten Spannung durchströmtes regelbares induktives Bauelement aufweist. Bei dieser Ausführungsform wird das an den Ferriten bereitgestellte Magnetfeld mit dem weiteren Magnetfeld des induktiven Bauelements überlagert. Diese Ausführungsform ist insbesondere vorteilhaft, weil dabei das Magnetfeld direkt geregelt wird, was typischerweise vergleichsweise schnell erfolgen kann.

[0030] Eine Ausführungsform sieht vor, dass das induktive Bauelement zumindest eine elektromagnetische Spule aufweist. Die zumindest eine elektromagnetische Spule ermöglicht vorteilhafterweise ein präzises Beeinflussen des Magnetfelds durch die Einprägung des eingestellten Stroms und/oder der eingestellten Spannung. Die zumindest eine elektromagnetische Spule ist beispielsweise bei einem der Ferrite angeordnet. Zusätzlich kann eine weitere elektromagnetische Spule bei einem anderen Ferrit angeordnet sein. Die Anordnung der Ferrite und der zumindest einen elektromagnetischen Spule ist typischerweise symmetrisch. Die Spule besteht beispielsweise aus Kupfer.

[0031] Eine Ausführungsform sieht vor, dass das elektrische Phasenstabilisierungselement zusätzlich einen Permanentmagneten aufweist, um welchen die zumindest eine elektromagnetische Spule gewickelt ist. Alternativ kann die elektromagnetische Spule um den weiteren Permanentmagneten gewickelt sein. Die zumindest eine elektromagnetische Spule und der Permanentmagnet oder der weitere Permanentmagnet bilden insbesondere einen besonders vorteilhaften regelbaren Magneten zur Beeinflussung des Magnetfelds. Zum Schließen eines magnetischen Kreises kann ein U-förmiges Joch um die zumindest eine elektromagnetische Spule und um den Permanentmagneten bzw. den weiteren Permanentmagneten herum angeordnet sein.

[0032] Eine Ausführungsform sieht vor, dass das elektrische Phasenstabilisierungselement zur Beeinflussung des Magnetfelds ein von dem eingestellten Strom und/oder der eingestellten Spannung durchströmtes regelbares elektrothermisches Bauelement zur Regelung einer Temperatur innerhalb des Zirkulators aufweist. Die Ausführungsform nutzt insbesondere den physikalischen Effekt der Temperaturabhängigkeit der Isolationsfähigkeit des Zirkulators, wobei die Temperatur wiederum die Permeabilität beeinflusst. Gibt beispielsweise die Messgröße eine vergleichsweise geringe Isolationsfähigkeit an, kann durch das Regeln der Temperatur die Isolationsfähigkeit teilweise, vorzugsweise vollständig oder maximal, wiederhergestellt werden. Das elektrothermische Bauelement ermöglicht vorteilhafterweise eine geregelte Temperierung des Zirkulators. Typischerweise ist das elektrothermische Bauelement thermisch direkt mit dem Zirkulator, insbesondere den Ferriten, gekoppelt. Grundsätzlich ist es denkbar, dass zwischen

dem elektrothermischen Bauelement und dem Zirkulator ein wärmeübertragendes Element, beispielsweise ein Kühlkörper und/oder ein gasförmiger oder fluidbasierter Kühlkreislauf vorgesehen ist.

[0033] Eine Ausführungsform sieht vor, dass das elektrothermische Bauelement ein elektrothermischer Wandler, insbesondere ein Peltier-Element, ist. Der elektrothermische Wandler ermöglicht in Abhängigkeit des eingestellten Stroms und/oder der eingestellten Spannung ein präzises Regeln der Temperatur des Zirkulators, insbesondere der Ferrite.

[0034] Eine Ausführungsform sieht vor, dass die Hochfrequenzquelle eine Messeinrichtung für ein Messen einer elektromagnetischen Größe der zurückgestreuten Mikrowellen aufweist, wobei die elektromagnetische Größe die die magnetische Permeabilität des Zirkulators beschreibende Messgröße ist.

[0035] Eine Ausführungsform sieht vor, dass die elektromagnetische Größe eine Amplitude und/oder eine Phase der zurückgestreuten Mikrowellen beschreibt. Die elektromagnetische Größe kann insbesondere in Bezug auf eine elektromagnetische Größe der generierten Mikrowellen bezogen oder normiert werden. Beispielfhaft ist es denkbar, einen Amplitudenunterschied und/oder einen Phasenunterschied zwischen den generierten Mikrowellen und den zurückgestreuten Mikrowellen zu berechnen. Die Regeleinheit ist insbesondere dazu ausgebildet, die elektromagnetische Größe beispielsweise mit einem Sollwert zu vergleichen. Der Sollwert kann ein konstanter Wert sein oder von dem Magnetfeld abhängen. Beispielsweise kann der Sollwert ein Wert zwischen 0 und 2π sein, wenn die elektromagnetische Größe die Phase der zurückgestreuten Mikrowellen beschreibt. Der Sollwert kann ein Wert einer insbesondere parabelförmigen Funktion über den Betrag des Magnetfelds sein, wenn die elektromagnetische Größe die Amplitude der zurückgestreuten Mikrowellen beschreibt.

[0036] Eine Ausführungsform sieht vor, dass zwischen der Messeinrichtung und dem Zirkulator ein Richtkoppler zur Separierung der generierten Mikrowellen und der zurückgestreuten Mikrowellen vorgesehen ist. Diese Ausführungsform ermöglicht vorteilhafterweise die separate Betrachtung der generierten Mikrowellen und der zurückgestreuten Mikrowellen.

[0037] Das erfindungsgemäße Linearbeschleunigersystem weist die Hochfrequenzquelle und eine Linearbeschleunigereinheit auf, wobei die Linearbeschleunigereinheit einen Teilchenemitter zur Emission von geladenen Teilchen, insbesondere Elektronen, und Kavitäten zur Beschleunigung der geladenen Teilchen, insbesondere der Elektronen, mittels der Mikrowellen aufweist. Das erfindungsgemäße Linearbeschleunigersystem weist die erfindungsgemäße Hochfrequenzquelle auf und teilt somit die zuvor beschriebenen Vorteile. Das Linearbeschleunigersystem ist insbesondere für eine Strahlentherapie, eine Werkstoffprüfung und/oder eine Sicherheitskontrolle ausgebildet.

[0038] Das Linearbeschleunigersystem wird insbe-

sondere dazu verwendet, die geladenen Teilchen, welche insbesondere Elektronen sind, entlang einer geraden Linie zu beschleunigen. Die geladenen Teilchen werden mittels der Hochfrequenzquelle auf Energien über 1 MeV und typischerweise unter 20 MeV, beispielsweise im Bereich 3 bis 9 MeV beschleunigt.

[0039] Der Teilchenemitter kann insbesondere ein Elektronenemitter sein. Der Elektronenemitter weist insbesondere einen thermionischen Emitter, beispielsweise einen Wendemitter oder einen sphärischen Emitter, oder einen kalten Emitter, beispielsweise mit Kohlenstoffröhren oder aus Silizium, auf. Der Elektronenemitter kann ein Gitter aufweisen zur Regulierung des Elektroneneinschusses.

[0040] Die Kavitäten sind insbesondere Linearbeschleunigerkavitäten und typischerweise evakuiert. Die Kavitäten bilden insbesondere einen Stehwellenbeschleuniger oder ein Wanderwellenbeschleuniger. Die Kavitäten sind typischerweise miteinander verbunden und aneinandergereiht angeordnet, so dass die geladenen Teilchen die Kavitäten nacheinander durchqueren. An dem einen Ende der aneinandergereihten Kavitäten ist üblicherweise der Teilchenemitter angeordnet und an dem anderen Ende typischerweise eine Austrittöffnung. Die Austrittöffnung kann mit einem vakuumdichten Fenster verschlossen sein.

[0041] Eine Ausführungsform sieht vor, dass die Linearbeschleunigereinheit ein innerhalb der Kavitäten vorgesehenes Target zur Erzeugung von MeV-Röntgenstrahlung in Abhängigkeit der beschleunigten geladenen Teilchen aufweist. Das Target ist typischerweise an einem Ende der aneinandergereihten Kavitäten gegenüber vom Teilchenemitter angeordnet. Das Target kann beispielsweise Teil der Austrittöffnung sein und die Austrittöffnung vakuumdicht verschließen. Das Target ist insbesondere ein Transmissionstarget. Die geladenen Teilchen treffen typischerweise in einem senkrechten Winkel auf die Oberfläche des Targets auf. Das Target weist typischerweise die Form einer Ronde auf. Die Ronde ist ein zylindrischer Körper üblicherweise mit einer geringen Höhe im Verhältnis zu dessen Durchmesser. Das Target besteht insbesondere aus einem Material mit einer hohen Ordnungszahl (Kernladungszahl, Z) und/oder hoher Dichte, z.B. Silber, Kupfer, Gold, Aluminium, Rhodium, Wolfram, Molybdän, Rhenium, Zirkonium, Chrom, Cobalt, Eisen, Mangan, Vanadium, Titan, Tantal, Indium, Iridium oder Beryllium oder einer Legierung der zuvor beschriebenen herkömmlichen Targetmaterialien. Das Targetmaterial des Targets kann insbesondere Wolfram sein. Vorteilhafterweise weist das Target zusätzlich zum Wolfram zum Beispiel Rhenium auf, so dass das Target zäher und somit robuster ist. Das Target kann auf einer dem Elektronenstrahl abgewandten Seite mit einem Kühlmedium in Kontakt stehen.

[0042] Das Linearbeschleunigersystem mit der Hochfrequenzquelle kann beispielsweise stationär oder mobil eingesetzt werden. Das Linearbeschleunigersystem kann vorteilhafterweise ohne dediziertes Kühlsystem

oder mit einem Kühlsystem mit vergleichbar geringer Kühlleistung betrieben werden. Das Linearbeschleunigersystem und/oder die Hochfrequenzquelle kann vorzugsweise passiv gekühlt sein.

[0043] Das Computerprogrammprodukt kann ein Computerprogramm sein oder ein Computerprogramm umfassen. Das Computerprogrammprodukt weist insbesondere die Programmcodemittel auf, welche die erfindungsgemäßen Verfahrensschritte abbilden. Dadurch kann das erfindungsgemäße Verfahren definiert und wiederholbar ausgeführt sowie eine Kontrolle über eine Weitergabe des erfindungsgemäßen Verfahrens ausgeübt werden. Das Computerprogrammprodukt ist vorzugsweise derart konfiguriert, dass die Recheneinheit mittels des Computerprogrammprodukts die erfindungsgemäßen Verfahrensschritte ausführen kann. Die Programmcodemittel können insbesondere in einen Speicher der Recheneinheit geladen und typischerweise mittels eines Prozessors der Recheneinheit mit Zugriff auf den Speicher ausgeführt werden. Wenn das Computerprogrammprodukt, insbesondere die Programmcodemittel, in der Recheneinheit ausgeführt wird, können typischerweise alle erfindungsgemäßen Ausführungsformen des beschriebenen Verfahrens durchgeführt werden. Das Computerprogrammprodukt ist beispielsweise auf einem physischen, computerlesbaren Medium gespeichert und/oder digital als Datenpaket in einem Computernetzwerk hinterlegt. Das Computerprogrammprodukt kann das physische, computerlesbare Medium und/oder das Datenpaket in dem Computernetzwerk darstellen. So kann die Erfindung auch von dem physischen, computerlesbaren Medium und/oder dem Datenpaket in dem Computernetzwerk ausgehen. Das physische, computerlesbare Medium ist üblicherweise unmittelbar mit der Recheneinheit verbindbar, beispielsweise indem das physische, computerlesbare Medium in ein DVD-Laufwerk eingelegt oder in einen USB-Port gesteckt wird, wodurch die Recheneinheit auf das physische, computerlesbare Medium insbesondere lesend zugreifen kann. Das Datenpaket kann vorzugsweise aus dem Computernetzwerk abgerufen werden. Das Computernetzwerk kann die Recheneinheit aufweisen oder mittels einer Wide-Area-Network- (WAN) bzw. einer (Wireless-)Local-Area-Network-Verbindung (WLAN oder LAN) mit der Recheneinheit mittelbar verbunden sein. Beispielsweise kann das Computerprogrammprodukt digital auf einem Cloud-Server an einem Speicherort des Computernetzwerks hinterlegt sein, mittels des WAN über das Internet und/oder mittels des WLAN bzw. LAN auf die Recheneinheit insbesondere durch das Aufrufen eines Downloadlinks, welcher zu dem Speicherort des Computerprogrammprodukts verweist, übertragen werden.

[0044] Bei der Beschreibung der Vorrichtung erwähnte Merkmale, Vorteile oder alternative Ausführungsformen sind ebenso auf das Verfahren zu übertragen und umgekehrt. Mit anderen Worten können Ansprüche auf das Verfahren mit Merkmalen der Vorrichtung weitergebildet sein und umgekehrt. Insbesondere kann die erfindungs-

gemäße Vorrichtung in dem Verfahren verwendet werden.

[0045] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der in den Figuren dargestellten Ausführungsbeispiele näher beschrieben und erläutert. Grundsätzlich werden in der folgenden Figurenbeschreibung im Wesentlichen gleich bleibende Strukturen und Einheiten mit demselben Bezugszeichen wie beim erstmaligen Auftreten der jeweiligen Struktur oder Einheit benannt.

[0046] Es zeigen:

Fig. 1 eine erfindungsgemäße Hochfrequenzquelle,

Fig. 2 ein erstes Ausführungsbeispiel der Hochfrequenzquelle,

Fig. 3 ein zweites Ausführungsbeispiel der Hochfrequenzquelle,

Fig. 4 ein erfindungsgemäßes Linearbeschleunigersystem mit einem 3-Tor-Zirkulator,

Fig. 5 ein erfindungsgemäßes Linearbeschleunigersystem mit einem 4-Tor-Zirkulator,

Fig. 6 ein erfindungsgemäßes Verfahren,

Fig. 7 einen exemplarischen Verlauf der Hochfrequenzleistung,

Fig. 8 einen ersten Regelkreis der Hochfrequenzquelle,

Fig. 9 einen zweiten Regelkreis der Hochfrequenzquelle,

Fig. 10 ein drittes Ausführungsbeispiel der Hochfrequenzquelle,

Fig. 11 ein viertes Ausführungsbeispiel der Hochfrequenzquelle und

Fig. 12 ein fünftes Ausführungsbeispiel der Hochfrequenzquelle.

[0047] Fig. 1 zeigt die erfindungsgemäße Hochfrequenzquelle 10 in einem schematischen Blockdiagramm.

[0048] Die Hochfrequenzquelle 10 ist für ein nicht gezeigtes Linearbeschleunigersystem ausgebildet. Die Hochfrequenzquelle 10 weist einen Mikrowellengenerator 11 zum Generieren von Mikrowellen, eine Regeleinheit 12 und einen Zirkulator 13 auf. Die Regeleinheit 12 ist für einen Empfang einer magnetischen Permeabilität des Zirkulators 13 beschreibenden Messgröße ausgebildet.

[0049] Der Zirkulator 13 ist ein ferritischer 3-Tor-Zirkulator mit Y-Form, welche in Fig. 1 perspektivisch darge-

stellt ist, und weist Ferrite 13.F zur Isolation des Mikrowellengenerators 11 gegen zurückgestreute Mikrowellen durch Beeinflussung der Phasenlage der Mikrowellen in Abhängigkeit eines Magnetfelds 13.B auf. Das Magnetfeld 13.B ist rein für illustratorische Zwecke als gestrichelter gerichteter Pfeil in Fig. 1 eingezeichnet. Der Zirkulator 13 weist ferner ein elektrisches Phasenstabilisierungselement 14 auf. An den Zirkulator 13 ist der Mikrowellengenerator 11, aber in diesem Ausführungsbeispiel keine Nutzlast und keine Last angeschlossen.

[0050] Die Regeleinheit 12 ist für ein derartiges Einstellen eines Stroms und/oder einer Spannung des elektrischen Phasenstabilisierungselements 14 zur Beeinflussung des Magnetfelds 13.B in Abhängigkeit von der empfangenen Messgröße ausgebildet, dass ein Amplitudenunterschied der generierten Mikrowellen und der zurückgestreuten Mikrowellen maximal ist.

[0051] Fig. 2 zeigt ein erstes Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen Hochfrequenzquelle 10. In Fig. 2 ist ein zentraler Querschnitt durch den Zirkulator 13 gezeigt.

[0052] Das elektrische Phasenstabilisierungselement 14 zur Beeinflussung des Magnetfelds 13.B weist ein von dem eingestellten Strom und/oder der eingestellten Spannung durchströmtes regelbares induktives Bauelement 15 auf. Das induktive Bauelement 15 weist zumindest eine elektromagnetische Spule 15.S auf. Das elektrische Phasenstabilisierungselement 14 weist zusätzlich einen Permanentmagneten 15.P auf, um welchen die zumindest eine elektromagnetische Spule 15.S gewickelt ist. Fig. 2 zeigt, dass zwei Spulen 15.S um je einen Permanentmagneten 15.P gewickelt sind. Das induktive Bauelement 14 umschließt den Hohlraum 13.H des Zirkulators 13 und die Ferrite 13.F. Die Ferrite 13.F sind vorteilhafterweise zwischen den zwei Spulen 15.S angeordnet. Der magnetische Kreis umfasst insbesondere das Joch 13.J, die zumindest eine elektromagnetische Spule 15.S, den Permanentmagneten 15.P, die Ferrite 13.F und den Spalt im Hohlraum 13.H.

[0053] Fig. 3 zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen Hochfrequenzquelle 10. Dieses Ausführungsbeispiel ist ausdrücklich mit dem in Fig. 2 gezeigten Ausführungsbeispiel kombinierbar.

[0054] Das elektrische Phasenstabilisierungselement 14 weist zur Beeinflussung des Magnetfelds 13.B ein von dem eingestellten Strom und/oder der eingestellten Spannung durchströmtes regelbares elektrothermisches Bauelement 16 zur Regelung einer Temperatur innerhalb des Zirkulators 13 auf. Das elektrothermische Bauelement 16 ist ein elektrothermischer Wandler, insbesondere ein Peltier-Element 16.P. In Fig. 3 ist das Peltier-Element 16.P mit einer Schneeflocke gekennzeichnet, weil das elektrothermische Bauelement 16 die Temperatur innerhalb des Zirkulators 13 in Abhängigkeit von dem eingestellten Strom und/oder der eingestellten Spannung regelt.

[0055] In Fig. 3 ist weiterhin gezeigt, dass die Hochfrequenzquelle 10 eine Messeinrichtung 17 für ein Messen einer elektromagnetischen Größe der zurückge-

streuten Mikrowellen aufweist, wobei die elektromagnetische Größe die die magnetische Permeabilität des Zirkulators 13 beschreibende Messgröße ist. Die elektromagnetische Größe beschreibt eine Amplitude und/oder eine Phase der zurückgestreuten Mikrowellen. Die Messeinrichtung 17 ist mit der Regeleinheit 12 für ein Übertragen der gemessenen Messgröße verbunden.

[0056] Fig. 4 zeigt ein Blockdiagramm eines erfindungsgemäßen Linearbeschleunigersystems 20 mit einem 3-Tor-Zirkulator. Das erfindungsgemäße Linearbeschleunigersystem 20 weist die Hochfrequenzquelle 10 und eine Linearbeschleunigereinheit 21 auf. Die Linearbeschleunigereinheit 21 weist einen Teilchenemitter zur Emission von geladenen Teilchen und Kavitäten zur Beschleunigung der geladenen Teilchen mittels der Mikrowellen auf. Der Zirkulator 13 ist als 3-Tor-Zirkulator ausgebildet, wobei am ersten Tor der Mikrowellengenerator 11, am zweiten Tor die Linearbeschleunigereinheit 21 und am dritten Tor eine Last 13.L angeschlossen sind.

[0057] Fig. 5 zeigt ein Blockdiagramm eines erfindungsgemäßen Linearbeschleunigersystems 20 mit einem 4-Tor-Zirkulator. Im Vergleich zu dem in Fig. 4 gezeigten Ausführungsbeispiel ist an das zusätzliche Tor des Zirkulators 13 ein Reflexionsphasenschieber 19, welcher ein Teil der Hochfrequenzquelle 10 ist, angeschlossen. Anstatt des Reflexionsphasenschiebers 19 kann alternativ eine weitere Last angeschlossen sein. Die Linearbeschleunigereinheit 21 weist in diesem Ausführungsbeispiel ein innerhalb der Kavitäten vorgesehenes Target zur Erzeugung von MeV-Röntgenstrahlung in Abhängigkeit der beschleunigten geladenen Teilchen auf.

[0058] Fig. 5 zeigt ferner, dass zwischen der Messeinrichtung 17 und dem Zirkulator 13 ein Richtkoppler 18 zur Separierung der generierten Mikrowellen und der zurückgestreuten Mikrowellen vorgesehen ist.

[0059] Fig. 6 zeigt ein Flussdiagramm eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum Betreiben einer Hochfrequenzquelle 10.

[0060] Verfahrensschritt S100 kennzeichnet ein Empfangen einer magnetischen Permeabilität des Zirkulators 13 beschreibenden Messgröße in der Regeleinheit 12.

[0061] Verfahrensschritt S101 kennzeichnet ein Einstellen eines Stroms und/oder einer Spannung des elektrischen Phasenstabilisierungselements 14 zur Beeinflussung des Magnetfelds in Abhängigkeit von der Messgröße mittels der Regeleinheit 12 derart, dass ein Amplitudenunterschied der generierten Mikrowellen und der zurückgestreuten Mikrowellen maximal wird.

[0062] Fig. 7 zeigt einen zeitlichen Verlauf der Hochfrequenzleistung der generierten Mikrowellen (L1, gestrichelte Linie) und der zurückgestreuten Mikrowellen (L2, gepunktete Linie) in einem beispielhaften Zeitintervall, wobei als Nutzlast die Linearbeschleunigereinheit angeschlossen ist.

[0063] Der erste Anstieg von L2 beginnt typischerweise direkt am Anfang des Pulses L1 und ist insbesondere

das Ergebnis der Reflexion der Hochfrequenzleistung an der "leeren" Linearbeschleunigereinheit. In den Kavitäten sind also noch keine geladenen Teilchen. Der zweite Anstieg von L2 beginnt üblicherweise am Ende des Pulses L1, wenn die Linearbeschleunigereinheit kurzzeitig als eine Art Hochfrequenzquelle wirkt.

[0064] Am Zeitpunkt T1, sprich am Pulsanfang der generierten Mikrowellen L1, ist die Messgröße der zurückgestreuten Mikrowellen in erster Näherung unabhängig von der Frequenzanpassung des Mikrowellengenerators 11 an die Linearbeschleunigereinheit 21 und ist dominiert von der Streuung der generierten Mikrowellen.

[0065] Am Zeitpunkt T2 ist die Hochfrequenzquelle 10 in einem eingeschwungenen Zustand, typischerweise nach Frequenzanpassung des Mikrowellengenerators 11 an die Linearbeschleunigereinheit 21. Die Messgröße der zurückgestreuten Mikrowellen ist dominiert durch die Eingangsreflexion des Zirkulators 13.

[0066] Die in den folgenden Figuren gezeigten Regelkreise können grundsätzlich an beiden Zeitpunkten T1 und T2 arbeiten.

[0067] Fig. 8 zeigt einen ersten Regelkreis der Hochfrequenzquelle 10.

[0068] Aus dem Zirkulator 13 werden mittels des Richtkopplers 18 zurückgestreute Mikrowellen L2 ausgekoppelt und mittels der Messeinrichtung 17 gemessen zur Ermittlung der Messgröße. Die Messgröße wird an die Regeleinheit 12 übertragen, welche die Amplitude der zurückgestreuten Mikrowellen L2 kontinuierlich oder getaktet durch das Einstellen des Stroms und/oder der Spannung des elektrischen Phasenstabilisierungselements 14 minimiert, wodurch der Amplitudenunterschied der generierten Mikrowellen und der zurückgestreuten Mikrowellen maximal wird. Das elektrische Phasenstabilisierungselement 14 weist dafür ein induktives Bauelement 15 auf.

[0069] Fig. 9 zeigt einen zweiten Regelkreis der Hochfrequenzquelle 10.

[0070] Im Vergleich zum ersten Kreis misst die Messeinrichtung 17 die generierten Mikrowellen L1 und die zurückgestreuten Mikrowellen L2 zur Ermittlung der Messgröße, welche in diesem Fall den Phasenunterschied beschreibt. Die Regeleinheit 12 stellt den Strom und/oder die Spannung des elektrischen Phasenstabilisierungselements 14 derart ein, dass der Phasenunterschied im Wesentlichen einem Sollwert entspricht.

[0071] Fig. 10 und Fig. 11 zeigen ein drittes und viertes Ausführungsbeispiel der Hochfrequenzquelle 10 mit einem Peltier-Element 16.P ausschnittsweise. Diese beiden Ausführungsbeispiele basieren im Wesentlichen auf dem Ausführungsbeispiel der Fig. 2, wobei ein elektrothermisches Bauelement 16 zur Regelung der Temperatur innerhalb des Zirkulators 13 eingesetzt ist.

[0072] Das Peltier-Element 16.P ist in Fig. 10 mit einem Kühlsystem 22 mit vergleichbar geringer Kühlleistung thermisch direkt zur Temperaturstabilisierung gekoppelt. Die Kopplung zwischen dem Peltier-Element 16.P und dem Kühlsystem 22 kann mittels eines nicht ge-

zeigten Kühlkörpers erfolgen. Der Zirkulator 13 ist mit dem elektrothermischen Bauelement 16 thermisch direkt gekoppelt. Das Kühlsystem 22 weist einen ersten Kühlkreislauf auf, welcher einen Wärmetauscher 23, eine Heizung 24, eine Pumpe 25, einen Verteiler 26 und einen Sammler 27 umfasst.

[0073] Fig. 11 zeigt im Vergleich zu dem in Fig. 10 gezeigten Ausführungsbeispiel, dass der Zirkulator 13 mittels eines Zwischenkühlkreislaufs 28 an das Peltier-Element 16.P thermisch direkt zur Temperaturregelung gekoppelt ist.

[0074] Fig. 12 zeigt ein fünftes Ausführungsbeispiel der Hochfrequenzquelle 10. Das Kühlsystem 22 ist im Vergleich zu den Ausführungsbeispielen, welche das elektrothermische Bauelement 16 aufweisen, thermisch direkt mit dem Zirkulator 13 gekoppelt. Das Kühlsystem 22 kühlt also den Zirkulator 13 direkt. Den aufgrund der vergleichbar geringen Kühlleistung größeren Temperaturarbeitsbereich gleicht insbesondere das induktive Bauelement 15 durch die Beeinflussung des Magnetfelds aus.

[0075] Obwohl die Erfindung im Detail durch die bevorzugten Ausführungsbeispiele näher illustriert und beschrieben wurde, so ist die Erfindung dennoch nicht durch die offenbarten Beispiele eingeschränkt und andere Variationen können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Schutzbereich der Erfindung zu verlassen.

Patentansprüche

1. Hochfrequenzquelle (10) für ein Linearbeschleunigersystem (20), aufweisend:

- einen Mikrowellengenerator (11) zum Generieren von Mikrowellen,
- eine Regeleinheit (12) und
- einen Zirkulator (13), welcher Ferrite (13.F) zur Isolation des Mikrowellengenerators (11) gegen zurückgestreute Mikrowellen durch Beeinflussung der Phasenlage der Mikrowellen in Abhängigkeit eines Magnetfelds (13.B) aufweist,

dadurch gekennzeichnet,

dass der Zirkulator (13) ein elektrisches Phasenstabilisierungselement (14) aufweist,

wobei die Regeleinheit (12) für einen Empfang einer magnetischen Permeabilität des Zirkulators (13) beschreibenden Messgröße und für ein derartiges Einstellen eines Stroms und/oder einer Spannung des elektrischen Phasenstabilisierungselements (14) zur Beeinflussung des Magnetfelds (13.B) in Abhängigkeit von der empfangenen Messgröße ausgebildet ist,

dass ein Amplitudenunterschied der gene-

rierten Mikrowellen und der zurückgestreuten Mikrowellen maximal ist.

2. Hochfrequenzquelle (10) nach Anspruch 1, wobei das elektrische Phasenstabilisierungselement (14) zur Beeinflussung des Magnetfelds (13.B) ein von dem eingestellten Strom und/oder der eingestellten Spannung durchströmtes regelbares induktives Bauelement (15) aufweist.

3. Hochfrequenzquelle (10) nach Anspruch 2, wobei das induktive Bauelement (15) zumindest eine elektromagnetische Spule (15.S) aufweist.

4. Hochfrequenzquelle (10) nach Anspruch 3, wobei das elektrische Phasenstabilisierungselement (14) zusätzlich einen Permanentmagneten (15.P) aufweist, um welchen die zumindest eine elektromagnetische Spule (15.S) gewickelt ist.

5. Hochfrequenzquelle (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das elektrische Phasenstabilisierungselement (14) zur Beeinflussung des Magnetfelds (13.B) ein von dem eingestellten Strom und/oder der eingestellten Spannung durchströmtes regelbares elektrothermisches Bauelement (16) zur Regelung einer Temperatur innerhalb des Zirkulators (13) aufweist.

6. Hochfrequenzquelle (10) nach Anspruch 5, wobei das elektrothermische Bauelement (16) ein elektrothermischer Wandler, insbesondere ein Peltier-Element (16.P), ist.

7. Hochfrequenzquelle (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Hochfrequenzquelle (10) eine Messeinrichtung (17) für ein Messen einer elektromagnetischen Größe der zurückgestreuten Mikrowellen aufweist, wobei die elektromagnetische Größe die die magnetische Permeabilität des Zirkulators (13) beschreibende Messgröße ist.

8. Hochfrequenzquelle (10) nach Anspruch 7, wobei die elektromagnetische Größe eine Amplitude und/oder eine Phase der zurückgestreuten Mikrowellen beschreibt.

9. Hochfrequenzquelle (10) nach einem der Ansprüche 7 oder 8, wobei zwischen der Messeinrichtung (17) und dem Zirkulator (13) ein Richtkoppler (18) zur Separierung der generierten Mikrowellen und der zurückgestreuten Mikrowellen vorgesehen ist.

10. Linearbeschleunigersystem (20), aufweisend

- eine Hochfrequenzquelle (10) nach einem der

vorhergehenden Ansprüche und

- eine Linearbeschleunigereinheit (21), welche einen Teilchenemitter zur Emission von geladenen Teilchen und Kavitäten zur Beschleunigung der geladenen Teilchen mittels der Mikrowellen aufweist. 5

11. Linearbeschleunigersystem (20) nach Anspruch 10, wobei die Linearbeschleunigereinheit (21) ein innerhalb der Kavitäten vorgesehenes Target zur Erzeugung von MeV-Röntgenstrahlung in Abhängigkeit der beschleunigten geladenen Teilchen aufweist. 10

12. Verfahren zum Betreiben einer Hochfrequenzquelle (10) nach einem der Ansprüche 1 bis 9, mit den folgenden Schritten: 15

- Empfangen einer magnetischen Permeabilität des Zirkulators (13) beschreibenden Messgröße in der Regeleinheit (12), 20
- Einstellen eines Stroms und/oder einer Spannung des elektrischen Phasenstabilisierungselements (14) zur Beeinflussung des Magnetfelds in Abhängigkeit von der Messgröße mittels der Regeleinheit (12) derart, dass ein Amplitudenunterschied der generierten Mikrowellen und der zurückgestreuten Mikrowellen maximal wird. 25

13. Computerprogrammprodukt, welches direkt in einen Speicher einer Regeleinheit ladbar ist, mit Programmcodemitteln, um ein Verfahren nach Anspruch 12 auszuführen, wenn das Computerprogrammprodukt in der Regeleinheit ausgeführt wird. 30
35

40

45

50

55

FIG 1

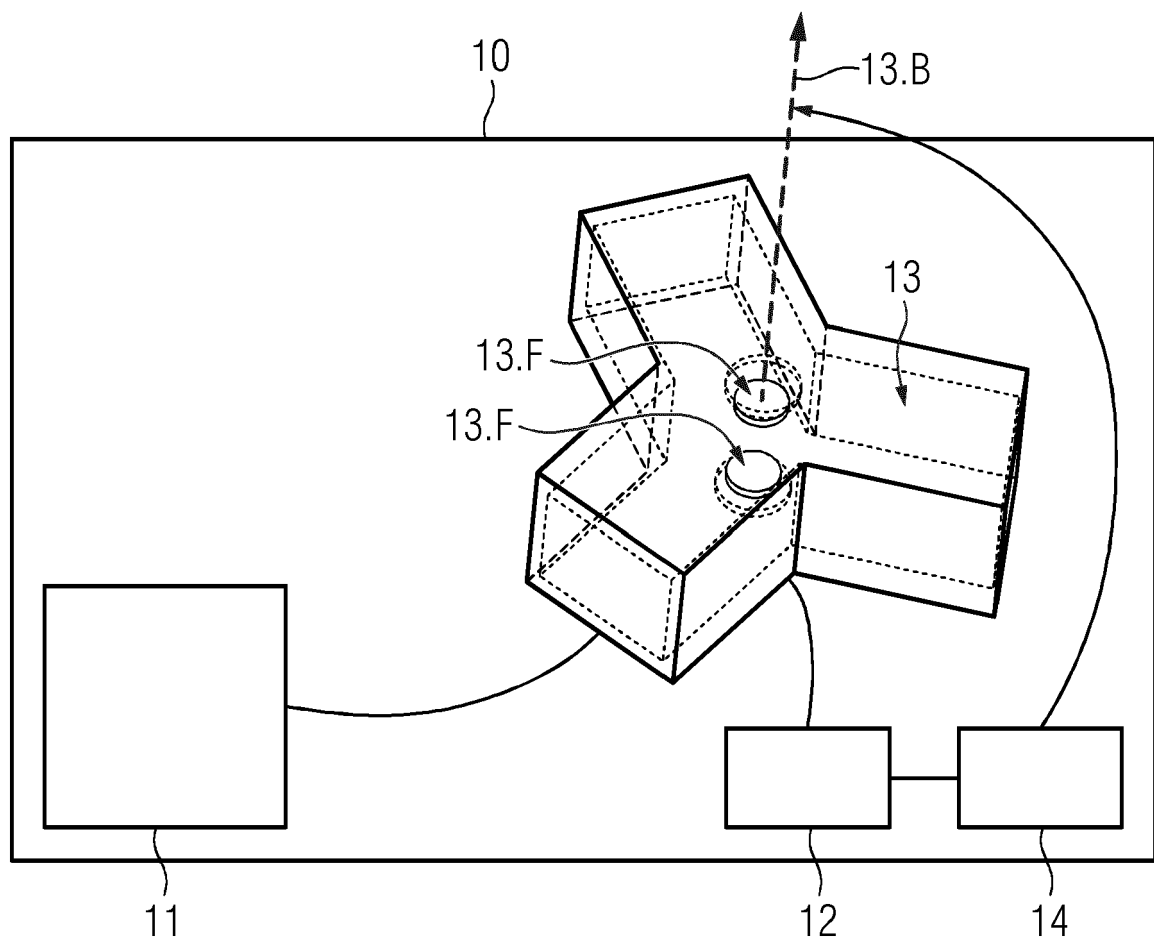


FIG 2

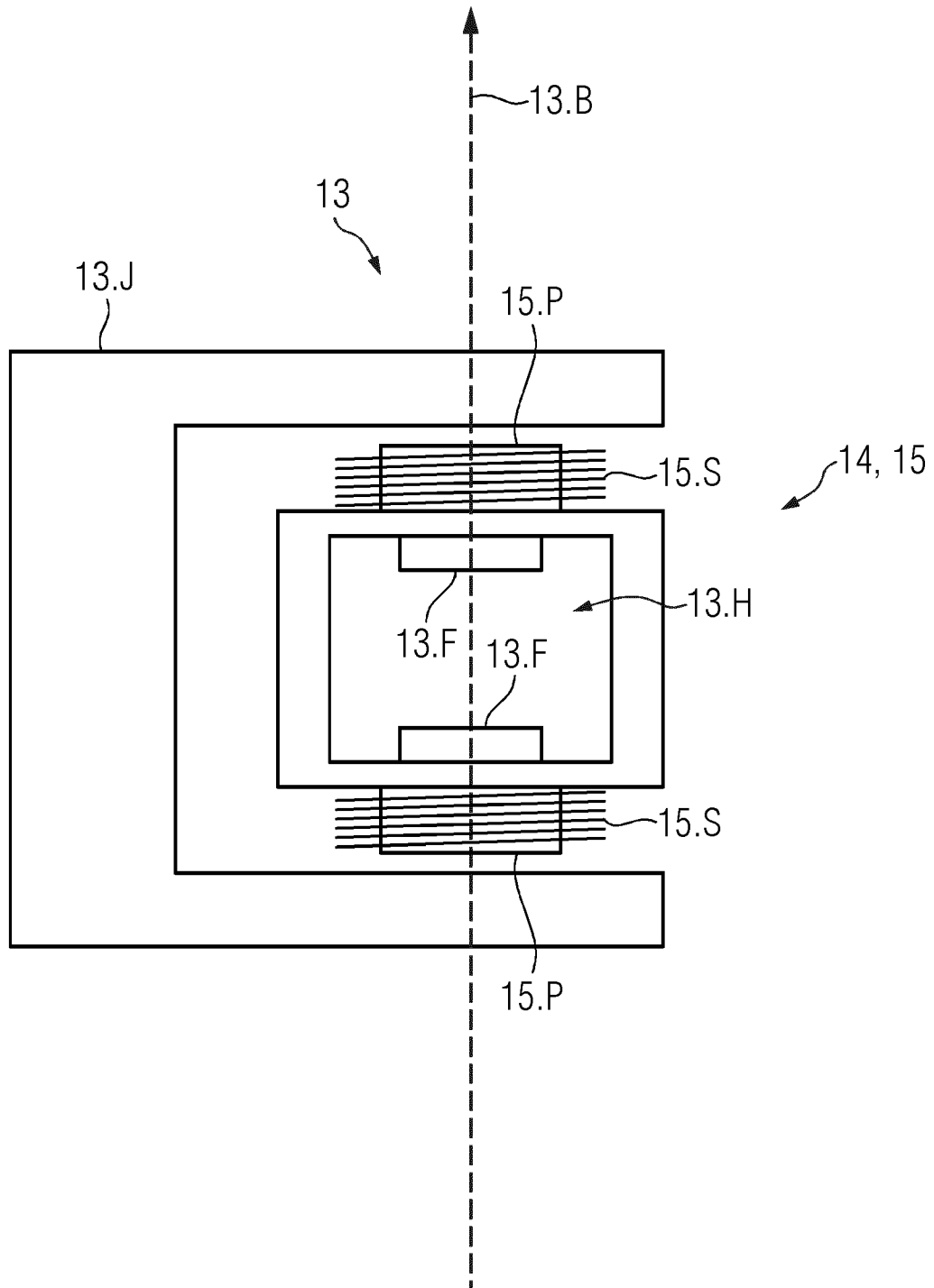


FIG 3

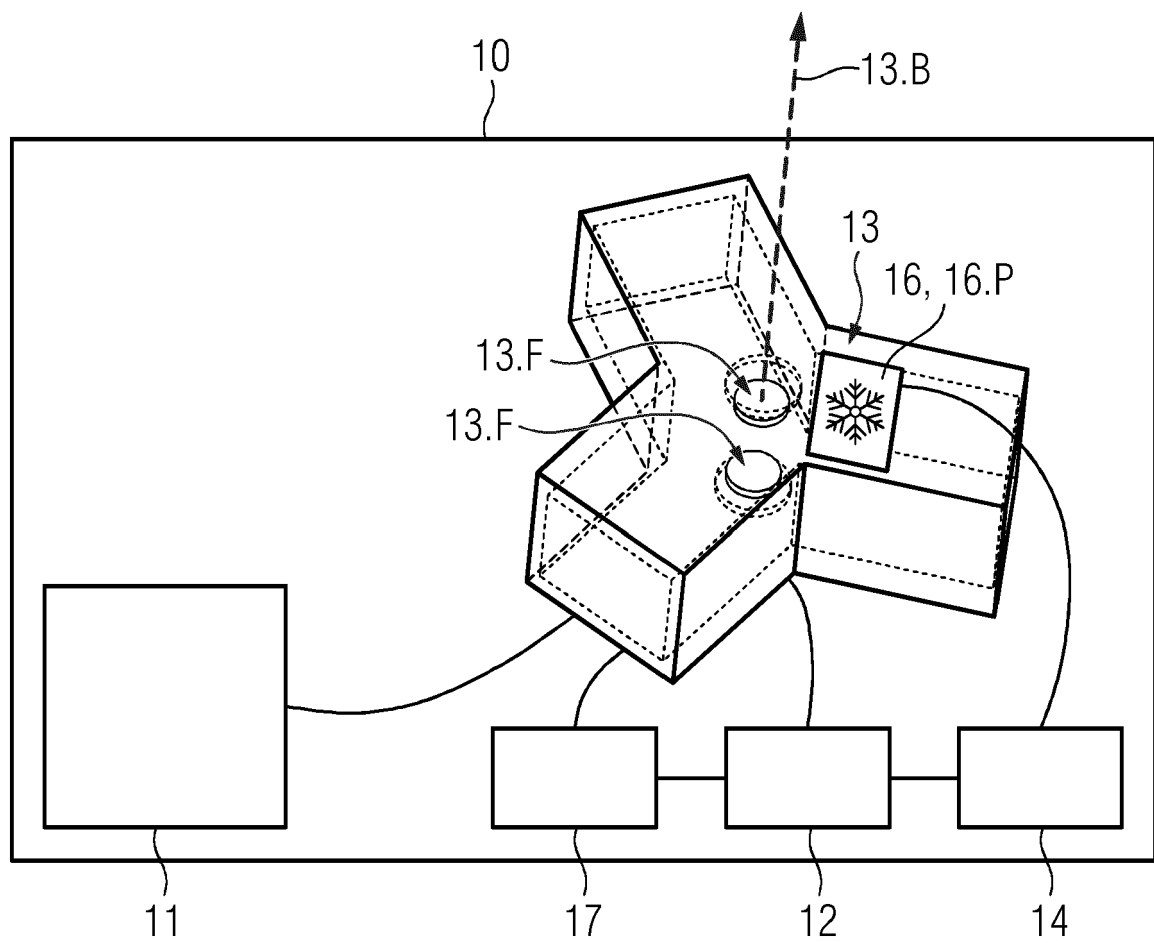


FIG 4

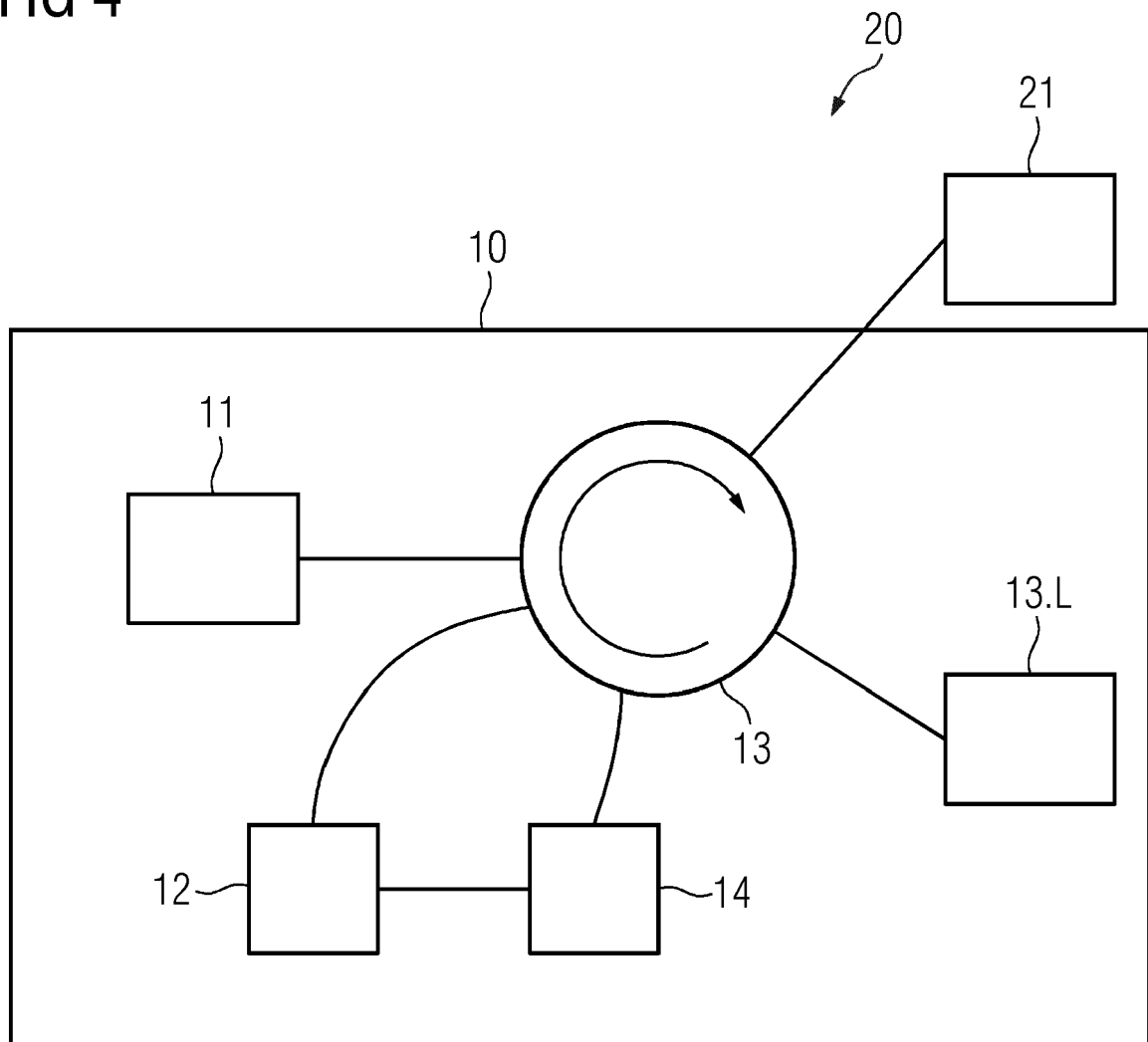


FIG 5

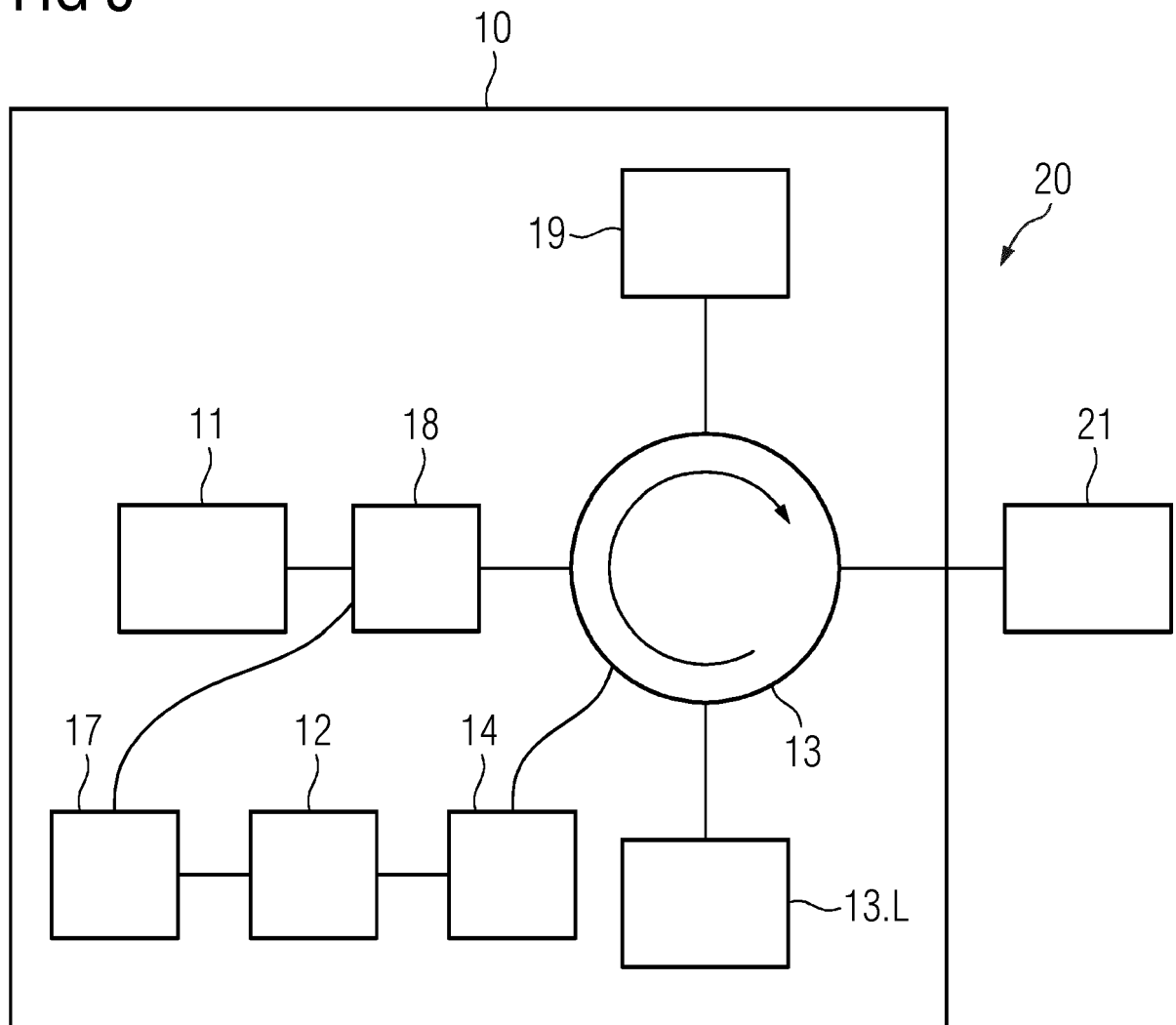


FIG 6

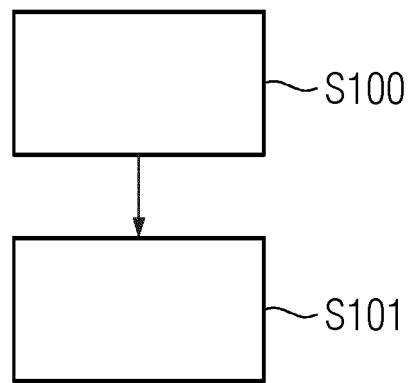


FIG 7

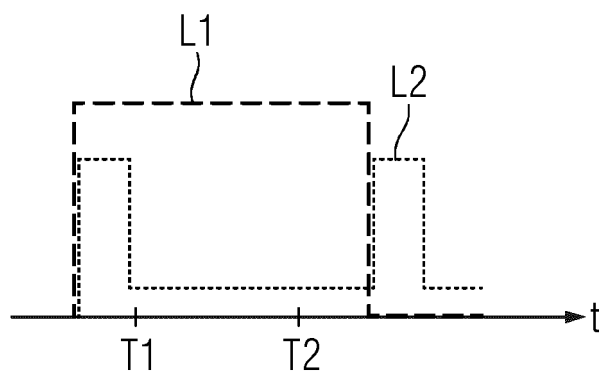


FIG 8

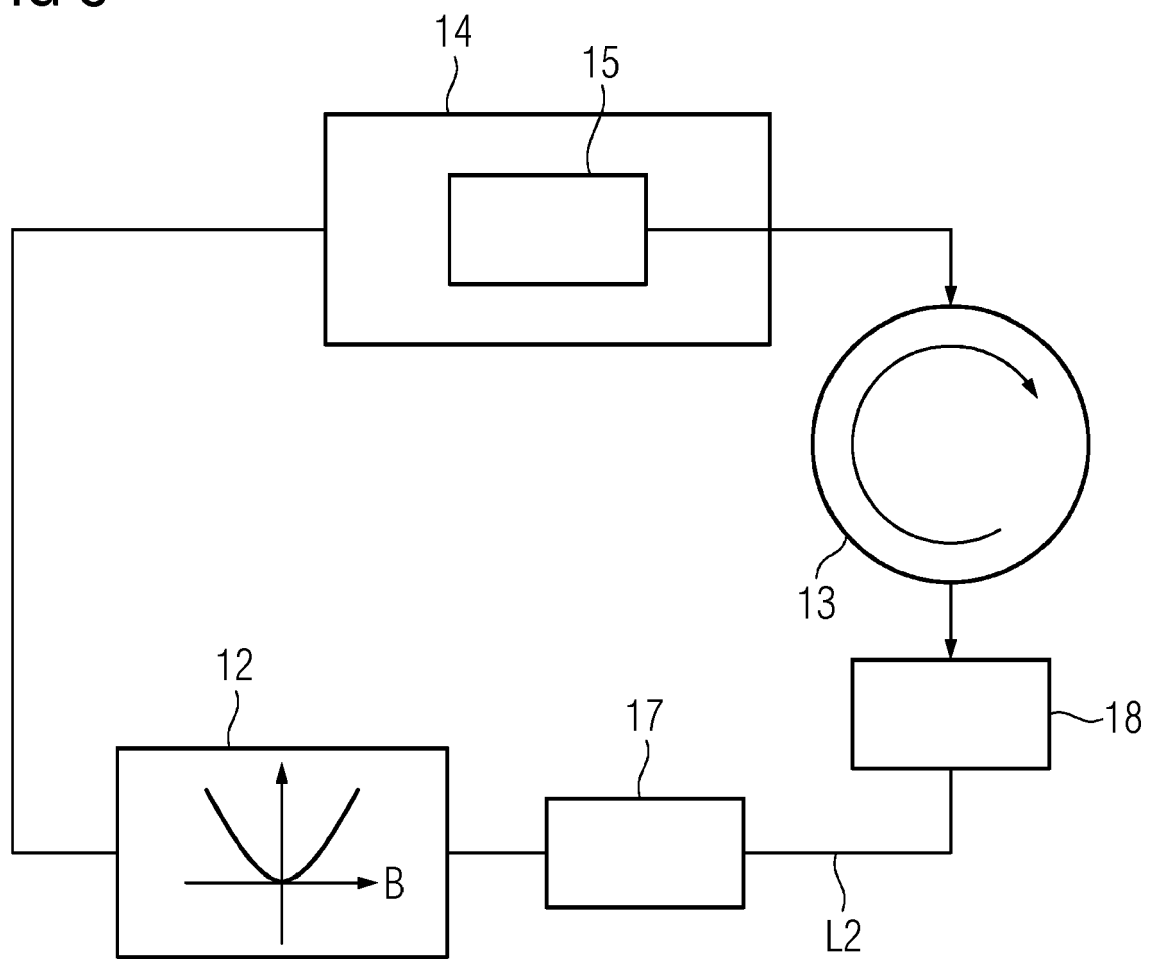


FIG 9

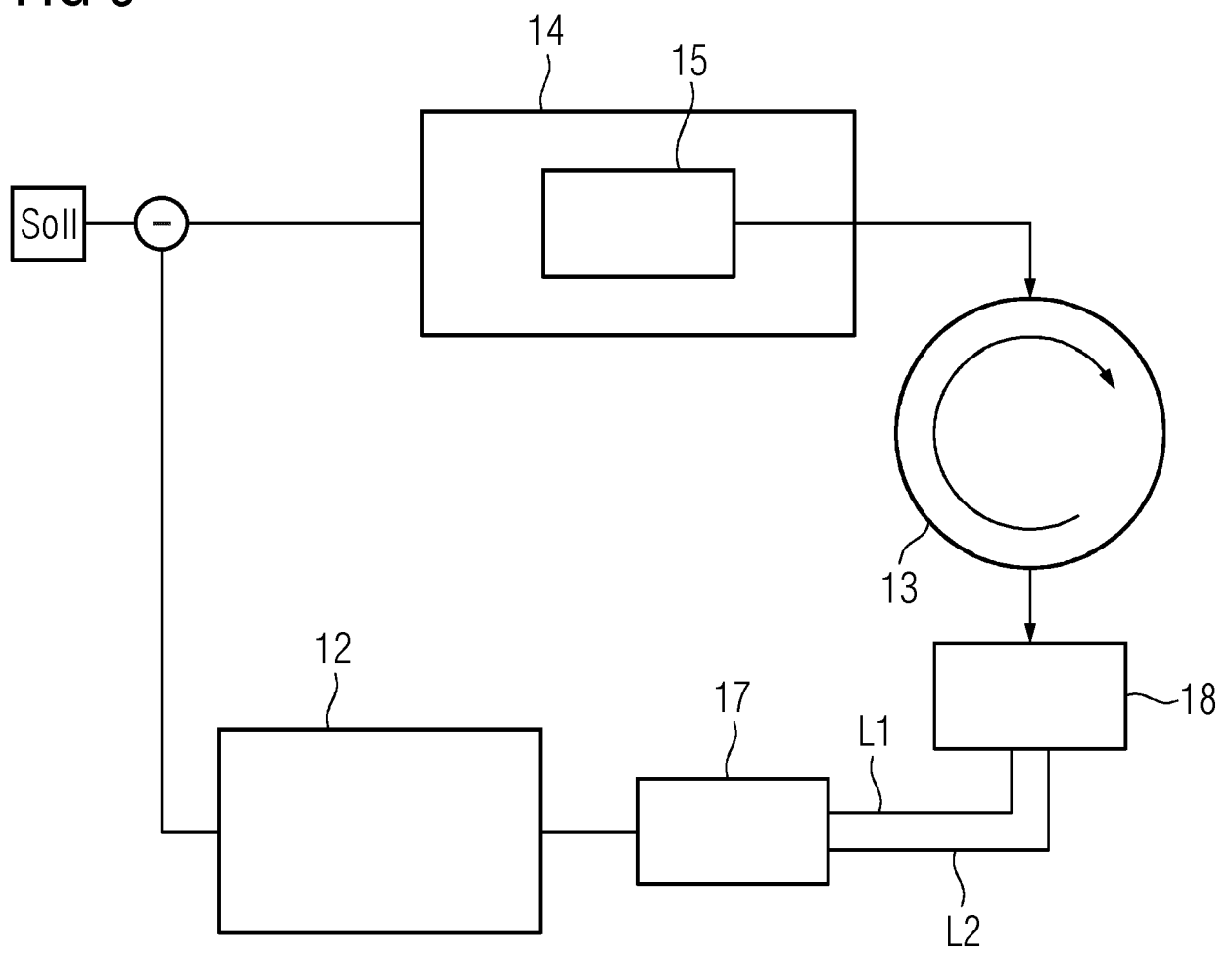


FIG 10

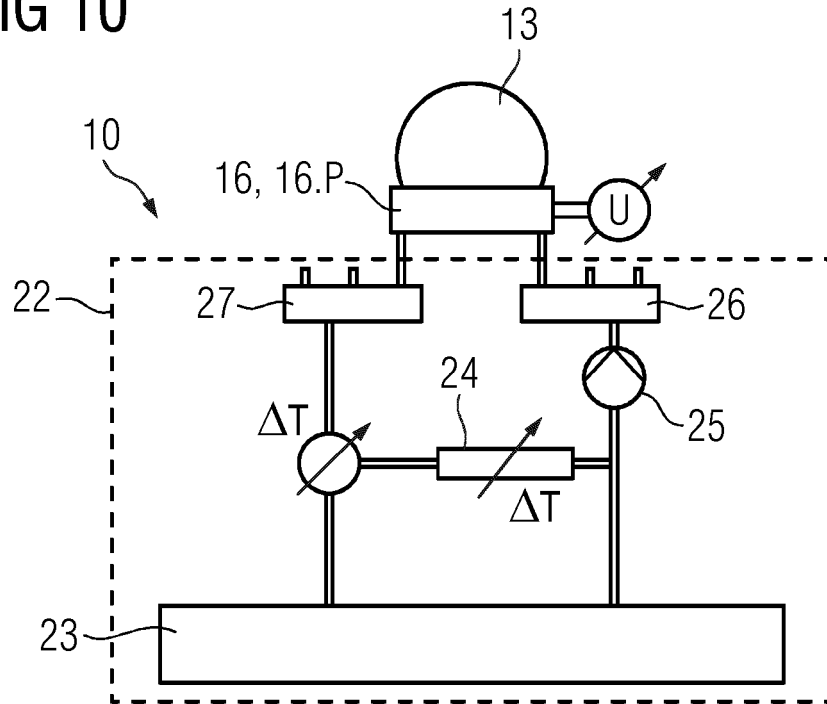


FIG 11

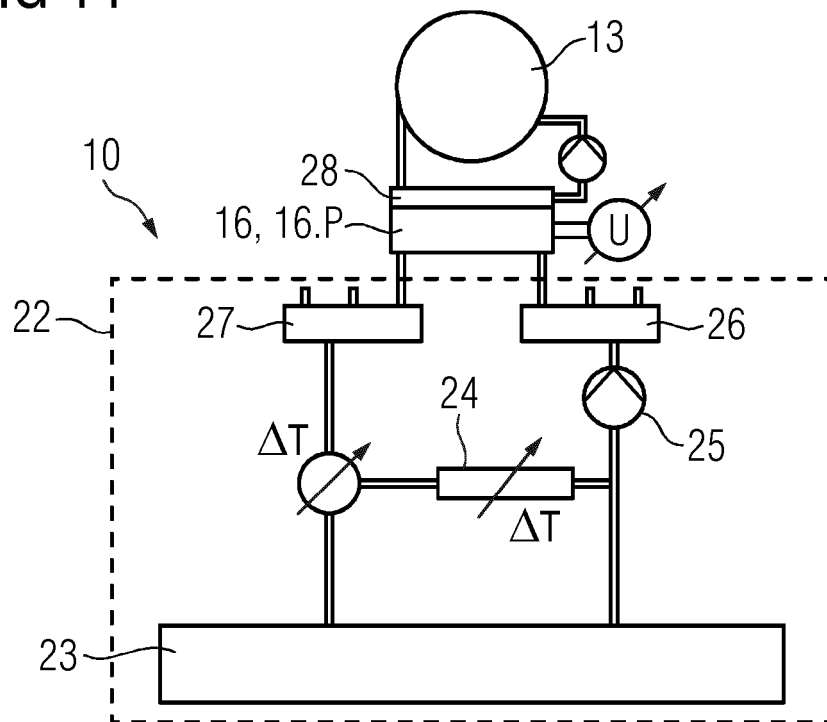
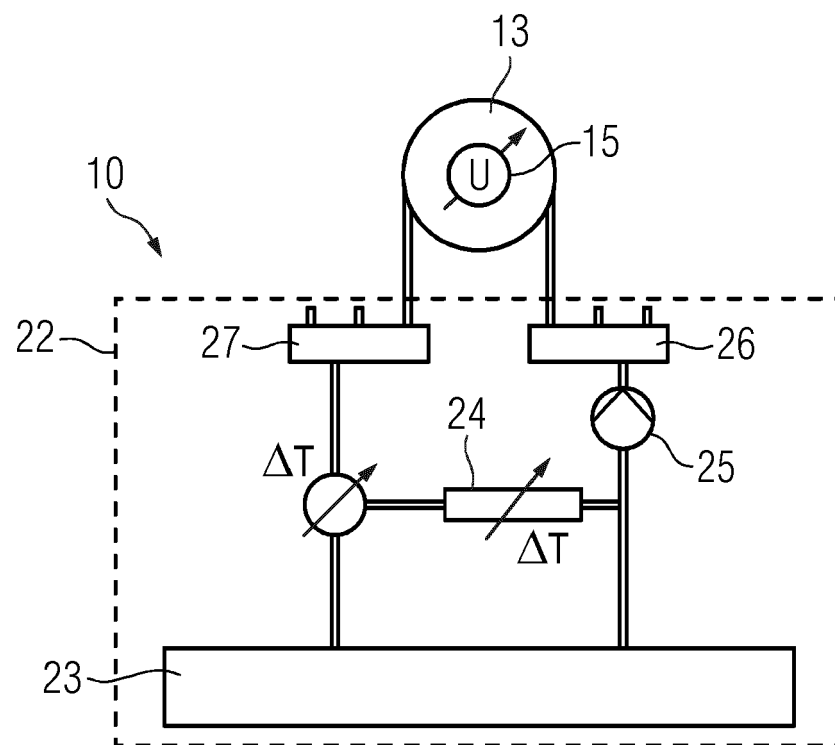


FIG 12





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 22 15 9014

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	PENG CHENGYAO ET AL: "Design of temperature compensating unit for the circulator in 6 MW 4.6 GHz LHCD system", FUSION ENGINEERING AND DESIGN, Bd. 112, 15. November 2016 (2016-11-15), Seiten 198-203, XP055938067, NL ISSN: 0920-3796, DOI: 10.1016/j.fusengdes.2016.08.017 * Kapitel 1 und 2; Abbildungen 1, 4-6, 9 *	1-4, 10, 12, 13	INV. H01P1/39 H05H7/22
X	US 5 291 290 A (VAUGHAN THOMAS J [US] ET AL) 1. März 1994 (1994-03-01) * Spalten 2, 3, 8 - Spalte 10; Abbildungen 1, 6-10 *	1, 5, 6, 10, 12, 13	
X	KIM JEEHYUN ET AL: "Test and operation of high-power RF system for KSTAR helicon current drive system", FUSION ENGINEERING AND DESIGN, ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS, AMSTERDAM, NL, Bd. 166, 9. April 2021 (2021-04-09), XP086540274, ISSN: 0920-3796, DOI: 10.1016/J.FUSENGDES.2021.112301 [gefunden am 2021-04-09] * Kapitel 1 und 2; Abbildungen 1, 2, 6 *	1-4, 7-13	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) H01P H05H
A	US 3 714 592 A (JORY H) 30. Januar 1973 (1973-01-30) * Spalte 3 - Spalte 5; Abbildung 1 *	11	
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort Den Haag		Abschlußdatum der Recherche 19. August 2022	Prüfer Hueso González, J
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 22 15 9014

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.

19-08-2022

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patentedokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
	US 5291290	A	01-03-1994	KEINE

15	US 3714592	A	30-01-1973	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

- DE 102012209185 A1 [0002]