



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2007 036 035 A1** 2009.02.05

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2007 036 035.7**

(22) Anmeldetag: **01.08.2007**

(43) Offenlegungstag: **05.02.2009**

(51) Int Cl.⁸: **A61N 5/10** (2006.01)
G21K 1/093 (2006.01)

(71) Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

(72) Erfinder:
**Kaiser, Werner, 91052 Erlangen, DE; Haßelt, Peter
van, Dr., 91058 Erlangen, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE11 2005 002154 T5

JP 10-3 14 323 A

EP 08 26 394 A2

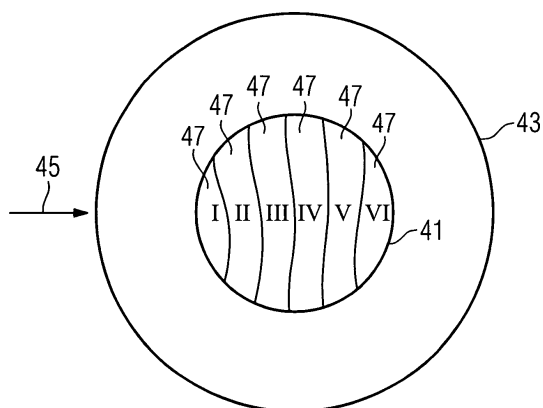
US 67 17 162 B1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Steuervorrichtung zur Steuerung eines Bestrahlungsvorgangs, Partikeltherapieanlage sowie Verfahren zur Bestrahlung eines Zielvolumens**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Steuervorrichtung zur Steuerung eines Bestrahlungsvorgangs, die derart ausgebildet ist, dass ein Zielvolumen durch zumindest zwei Bestrahlungsvorgänge bestrahlt wird, wobei bei jedem Bestrahlungsvorgang eine Energie eines Partikelstrahls derart variiert wird, dass das Zielvolumen schichtweise in Schichten, die in Strahlrichtung räumlich hintereinander angeordnet sind, bestrahlt wird, wobei eine Reihenfolge, in der die Schichten des Zielvolumens bei einem der Bestrahlungsvorgänge bestrahlt werden - bezogen auf eine Einfallsrichtung des Partikelstrahls -, von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang variiert wird. Weiterhin betrifft die Erfindung ein derartiges Verfahren zum Bestrahlen eines Zielvolumens mit einem Partikelstrahl sowie eine Partikeltherapieanlage mit einer derartigen Steuervorrichtung.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Steuervorrichtung zur Steuerung eines Bestrahlungsvorgangs bei einer Partikeltherapieanlage, eine Partikeltherapieanlage sowie ein Verfahren zur Bestrahlung eines Zielvolumens.

[0002] Die Partikeltherapie ist ein etabliertes Verfahren zur Behandlung von Gewebe, insbesondere von Tumorerkrankungen. Bestrahlungsverfahren, wie sie in der Partikeltherapie eingesetzt werden, können jedoch auch in nicht-therapeutischen Gebieten Anwendung finden kann. Hierzu gehören beispielsweise Forschungsarbeiten im Rahmen der Partikeltherapie, die an nicht-lebenden Phantomen oder Körpern durchgeführt werden, Bestrahlungen von Materialien, etc. Hierbei werden üblicherweise geladene Partikel auf hohe Energien beschleunigt, zu einem Partikelstrahl geformt und auf ein zu bestrahlendes Objekt gerichtet. Der Partikelstrahl dringt in das Objekt ein und gibt dort an einem definierten Ort seine Energie ab, was zu einer Zerstörung des sich dort befindlichen Gewebes führt. Als Partikel kommen üblicherweise Protonen, Kohlenstoffionen aber auch Pinnen, Heliumionen oder andere Ionensorten zum Einsatz.

[0003] Im Vergleich zu Bestrahlungsverfahren mit Röntgenstrahlen zeichnet sich die Partikeltherapie dadurch aus, dass die Partikel des Partikelstrahls den Hauptteil ihrer Energie in einem relativ gut abzugrenzenden Bereich innerhalb des Zielvolumens abgeben. Wo genau der Partikelstrahl mit dem Zielvolumen wechselwirkt, d. h. in welcher Tiefe des Zielvolumens bezogen auf die Strahlrichtung, hängt vorwiegend von der Energie des Partikelstrahls ab. Je höher die Energie des Partikelstrahls ist, desto weiter dringt der Partikelstrahl in das Zielvolumen ein und desto tiefer liegt der Bereich, in dem die Partikel den Hauptteil ihrer Energie an das Zielvolumen abgeben. Diese Eigenschaft der Partikeltherapie erlaubt es, ein zu bestrahlendes Zielvolumen innerhalb eines Objektes relativ genau zu bestrahlen und umliegende Bereiche zu schonen.

[0004] Andererseits bedeutet dies auch, dass ein Zielvolumen oftmals in mehreren Schichten bestrahlt werden muss. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn das Zielvolumen in Strahlrichtung derart groß ist, dass die Schicht, in der Partikel mit einer definierten Energie ihre Energie abgeben, so dünn ist, dass damit das Zielvolumen nicht durch den Partikelstrahl mit Partikeln der definierten Energie erfasst werden kann. In diesem Fall erfolgt oftmals eine schichtweise Bestrahlung des Zielvolumens, wobei bei jeder Schicht die Energie der Partikel an die Tiefe dieser Schicht in dem zu bestrahlenden Objekt angepasst wird.

[0005] Die Energie der Partikel wird ihrerseits oftmals nicht nur unmittelbar vor dem zu bestrahlenden Objekt eingestellt, sondern weit vorher im Strahlverlauf, beispielsweise im Bereich des Beschleunigers, mit dem Partikel auf eine zur Bestrahlung notwendige Energie beschleunigt werden, oder im Bereich des Hochenergiestrahlsystems, mit dem Partikel von einem Beschleuniger zu einem Bestrahlungsraum transportiert werden.

[0006] Besonders bei komplexen Bestrahlungsvorgängen, bei denen mehrere Schichten gegebenenfalls mehrmals bestrahlt werden, erfordert dies eine entsprechend komplexe Steuerung der Partikeltherapieanlage und Abstimmung der Energie des Partikelstrahls auf die zu bestrahlenden Schichten.

[0007] Es ist daher die Aufgabe der Erfindung, eine Steuervorrichtung zur Steuerung eines Bestrahlungsvorgangs bei einer Partikeltherapieanlage sowie eine Partikeltherapieanlage anzugeben, mit denen auch bei komplexen Bestrahlungsvorgängen mit einer komplexen Abstimmung der Energie des Partikelstrahls eine günstige und geringe Belastung der Komponenten einer Partikeltherapieanlage erreicht wird. Weiterhin ist es die Aufgabe der Erfindung ein Verfahren zur Bestrahlung eines Zielvolumens anzugeben, das auch bei komplexen Bestrahlungsvorgängen mit einer komplexen Abstimmung der Energie des Partikelstrahls Komponenten einer Partikeltherapieanlage in lediglich geringem Umfang belastet.

[0008] Die Erfindung wird demnach gelöst durch eine Steuervorrichtung nach Anspruch 1, durch eine Partikeltherapieanlage nach Anspruch 8, sowie durch ein Bestrahlungsverfahren nach Anspruch 11. Vorteilhafte Weiterbildungen finden sich in den Merkmalen der abhängigen Ansprüche.

[0009] Die Steuervorrichtung zur Steuerung eines Bestrahlungsvorgangs bei einer Partikeltherapieanlage ist dabei derart ausgebildet, dass ein Zielvolumen durch zumindest zwei Bestrahlungsvorgänge bestrahlt wird, wobei bei jedem Bestrahlungsvorgang eine Energie eines Partikelstrahls derart variiert wird, dass das Zielvolumen schichtweise in Schichten, die in Strahlrichtung räumlich hintereinander angeordnet sind, bestrahlt wird. Eine Reihenfolge, in der die Schichten des Zielvolumens bei einem der Bestrahlungsvorgänge bestrahlt werden, wird – bezogen auf eine Einfallrichtung des Partikelstrahls – von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang variiert.

[0010] Als Bestrahlungsvorgang wird dabei ein Teil einer Bestrahlungssitzung verstanden, bei dem zumindest ein Teil der Schichten des Zielvolumens sukzessive nacheinander bestrahlt werden. Die Bestrahlung der Schichten erfolgt während eines Bestrahlungsvorgangs in einer Richtung (bezogen auf die

Strahlrichtung), d. h. entweder in Strahlrichtung oder gegen Strahlrichtung.

[0011] Es wurde dabei erkannt, dass – falls Schichten eines Zielvolumens, die in mehreren Bestrahlungsvorgängen stets in einer gleichen Reihenfolge bestrahlt werden – die Energie des Partikelstrahls entsprechend eingestellt werden muss. Dieses Einstellen der Energie führt zu einer ungünstigen Belastung von Komponenten einer Partikeltherapieanlage, insbesondere bei dem Übergang von einem Bestrahlungsvorgang zum nächsten Bestrahlungsvorgang, vor allem, wenn die Energieänderung große Sprünge aufweist. Wenn beispielsweise Schichten eines Zielvolumens stets in einer Richtung – z. B. stets von vorn nach hinten bezogen auf die Strahlrichtung – bestrahlt werden, muss die Energie bei dem Übergang von einem Bestrahlungsvorgang zu dem nächsten Bestrahlungsvorgang von einem maximalen Wert zu einem minimalen Wert geregelt werden. Dieser abrupte Sprung in der Energie des Partikelstrahls führt zu einer ungünstigen Belastung der Komponenten einer Partikeltherapieanlage.

[0012] Insbesondere, wenn bei einer Partikeltherapieanlage supraleitende Magnete zur Strahlführung eingesetzt werden, muss ein Magnetfeld dieser supraleitenden Magnete der Energie des Partikelstrahls angepasst werden. Wenn nun die Energie des Partikelstrahls sich abrupt ändert, führt die schnelle Anpassung des Magnetfeldes zu Wechselfeldverlusten (im Folgenden auch als "AC-Verluste" genannt). Da AC-Verluste zu erhöhtem Kühlleistungsbedarf führen, werden insgesamt Komponenten der Partikeltherapieanlage stark belastet. Bisher wurde das Problem dadurch gelöst, dass entweder eine erhöhte Kühlleistung bereitgestellt wurde oder dass die Änderung des Magnetfeldes nur langsam durchgeführt wird. Beides ist mit Nachteilen verbunden, entweder mit erhöhten Kosten oder mit einem erhöhten Zeitaufwand bei komplexen Bestrahlungsvorgängen. Eine starke Belastung von Komponenten einer Partikeltherapieanlage ist jedoch nicht nur auf supraleitende Magnete beschränkt, auch wenn hier die Belastung aufgrund der deutlich erhöhten Kühlleistung stärker erkennbar wird.

[0013] Die Steuervorrichtung erlaubt es, die Reihenfolge, in der die Schichten bei einem Bestrahlungsvorgang bestrahlt werden, von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang zu variieren. Hierdurch wird es ermöglicht, große Übergänge bzw. Sprünge der Energie des Partikelstrahls zu vermeiden.

[0014] Die Reihenfolge, in der die Schichten bei einem Bestrahlungsvorgang bestrahlt werden, wird vorzugsweise so geändert, dass beim Übergang von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang die gleiche Schicht oder benachbarte Schichten be-

strahlt werden, insbesondere direkt benachbarte Schichten.

[0015] Die Energie des Partikelstrahls wird hierdurch in lediglich geringem Umfang geändert, von Schicht zu Schicht und von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang. Die Reihenfolge der Schichten, die bei einem Bestrahlungsvorgang bestrahlt werden, kann bei dem nächsten Bestrahlungsvorgang beispielsweise umgedreht werden.

[0016] In einer Ausführungsform ist die Steuervorrichtung derart ausgebildet, dass die Reihenfolge der Schichten, die bei einem Bestrahlungsvorgang bestrahlt werden, von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang bezogen auf die Einfallsrichtung alternierend durchlaufen wird. Wenn bei einem ersten Bestrahlungsvorgang die Schichten beispielsweise von vorne nach hinten bezogen auf die Strahlrichtung bestrahlt werden, wird diese Richtung im nächsten Bestrahlungsvorgang umgedreht, so dass die Schichten nun von hinten nach vorn bestrahlt werden. Die Energie des Partikelstrahls ändert sich hierdurch von einem minimalen zu einem maximalen Wert und anschließend von dem maximalen Wert wieder hin zum minimalen Wert. Die so entstehende Belastung für Komponenten der Partikeltherapieanlage ist vergleichsweise gering.

[0017] Die Bestrahlung einer der Schichten kann dabei durch ein Scattering-Verfahren oder durch ein Scan-Verfahren erfolgen. Bei dem Scattering-Verfahren wird der Partikelstrahl in seiner lateralen Ausdehnung aufgeweitet und an die Dimensionen der zu bestrahlenden Schicht angepasst, beispielsweise durch einen Kollimator. Bei dem Scan-Verfahren hingegen behält der Partikelstrahl eine vergleichsweise geringe laterale Ausdehnung, z. B. von wenigen Millimetern, und wird sukzessive auf verschiedene Punkte der Schicht gelenkt, so dass die Schicht durch den Partikelstrahl z. B. rasterförmig "gescannt" wird.

[0018] Bei den zumindest zwei Bestrahlungsvorgängen können stets die gleichen Schichten im Zielvolumen bestrahlt werden, oder aber auch unterschiedliche Schichten im Zielvolumen bestrahlt werden. So können beispielsweise die Schichten im Zielvolumen von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang neu positioniert werden, wenn beispielsweise bei jedem Bestrahlungsvorgang ein unterschiedliches Bestrahlungsfeld bestrahlt wird.

[0019] Die Einfallsrichtung des Partikelstrahls kann dabei von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang gleich bleiben oder aber auch variiert werden.

[0020] Die Steuervorrichtung muss dabei nicht zwangsläufig eine abgeschlossene Einheit einer Partikeltherapieanlage sein. Die Steuervorrichtung kann genauso gut auf einzelne Teilverrichtungen aufgeteilt

sein, die in ihrem Zusammenwirken die Funktionalität der Steuervorrichtung bereitstellen. Beispielsweise kann die Steuervorrichtung durch eine Steuervorrichtung zur Steuerung der Energie des Partikelstrahls, und durch eine Steuervorrichtung zur Umsetzung von in einem Therapieplan hinterlegten Steuerkommandos realisiert sein, die derart ausgebildet ist, dass eine Reihenfolge von zu bestrahlenden Schichten von Bestrahlung zu Bestrahlungsvorgang variiert wird.

[0021] Die erfindungsgemäße Partikeltherapieanlage umfasst:

- eine Partikelquelle zur Erzeugung von Partikeln,
- einen Beschleuniger zur Beschleunigung der Partikel und zur Bereitstellung eines hochenergetischen Partikelstrahls,
- ein Hochenergiestrahls-transportsystem zur Führung eines aus den beschleunigten Partikeln geformten Partikelstrahls in einen Bestrahlungsraum,
- eine Energieeinstellvorrichtung, mit der eine Energie des Partikelstrahls einstellbar ist, und
- eine Steuervorrichtung zur Steuerung eines Bestrahlungsvorgangs nach einem der Ansprüche 1 bis 7, mit der die Energieeinstellvorrichtung steuerbar ist.

[0022] Die Energieeinstellvorrichtung kann beispielsweise den Beschleuniger derart steuern, dass die Partikel derart beschleunigt werden, dass eine gewünschte Energie des Partikelstrahls erreicht wird. Eine solche Einstellung der Energie des Partikelstrahls ist insbesondere bei einem Beschleuniger, der als Synchrotron ausgebildet ist, möglich. Bei einem Beschleuniger, der als Zyklotron ausgebildet ist, kann eine Einstellung der Energie des Partikelstrahls z. B. mithilfe eines Energie-Selektions-Systems nach Beschleunigung der Partikel erfolgen.

[0023] Insbesondere kann der Beschleuniger oder das Hochenergiestrahls-transportsystem zumindest einen supraleitenden Magneten umfassen. In diesem Fall wirkt sich die Steuervorrichtung zur Steuerung eines Bestrahlungsvorgangs besonders vorteilhaft aus, da – wie bereits beschrieben – der supraleitende Magnet nur geringe AC-Verluste erzeugen wird, auch wenn komplexe Bestrahlungsvorgänge ausgeführt werden. Die Energieeinstellvorrichtung steuert dabei die Energie des Partikelstrahls in Strahlrichtung insbesondere vor dem supraleitenden Magneten, d. h. bevor der Partikelstrahl durch das Magnetfeld des supraleitenden Magneten geführt wird. Dessen Magnetfeld ist wiederum auf die Energie des Partikelstrahls abgestimmt. Dies kann beispielsweise dadurch erfolgen, dass die Steuervorrichtung zur Steuerung des Bestrahlungsvorgangs, mit dem die Energie des Partikelstrahls eingestellt wird, gleichzeitig das Magnetfeld während eines Bestrahlungsvorgangs steuert.

[0024] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zum Steuern der Energie eines Partikelstrahls während einer Bestrahlung eines Zielvolumens, bei der ein Zielvolumen durch zumindest zwei Bestrahlungsvorgänge bestrahlt wird, wird die Energie eines Partikelstrahls derart variiert,

- dass bei jedem Bestrahlungsvorgang das Zielvolumen schichtweise in Schichten, die in Strahlrichtung räumlich hintereinander angeordnet sind, bestrahlt wird, und
- dass eine Reihenfolge, in der die Schichten des Zielvolumens bei einem der Bestrahlungsvorgänge bestrahlt werden, – bezogen auf eine Einfallsrichtung des Partikelstrahls – von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang variiert wird.

[0025] Insbesondere wird die Reihenfolge der Schichten von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang alternierend durchlaufen, jeweils bezogen auf die Einfallsrichtung des Partikelstrahls. Die Energie des Partikelstrahls kann eingestellt werden, bevor der Partikelstrahl durch einen supraleitenden Magneten eines Beschleunigers oder eines Hochenergiestrahls-transportsystems geführt wird. In diesem Fall wird das Magnetfeld des supraleitenden Magneten an die Energie des Partikelstrahls angepasst.

[0026] Ausführungsformen der Erfindung sowie Weiterbildungen gemäß den Merkmalen der unabhängigen Ansprüche werden anhand der folgenden Zeichnung näher erläutert, ohne jedoch darauf beschränkt zu sein. Es zeigen:

[0027] [Fig. 1](#) einen schematischen Aufbau einer Partikeltherapieanlage,

[0028] [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#) die schichtweise Bestrahlung eines Zielvolumens bei zwei aufeinander folgenden Bestrahlungsvorgängen, wobei dieselben Schichten bestrahlt werden und ein Partikelstrahl mit derselben Einfallsrichtung angewendet wird, und

[0029] [Fig. 4](#) und [Fig. 5](#) die schichtweise Bestrahlung eines Zielvolumens während zwei aufeinander folgenden Bestrahlungsvorgängen, wobei jeweils unterschiedliche Schichten bestrahlt werden mit einem Partikelstrahl mit geänderter Einfallsrichtung.

[0030] [Fig. 1](#) zeigt einen schematischen Überblick über den Aufbau einer Partikeltherapieanlage **10**. In einer Partikeltherapieanlage **10** erfolgt insbesondere eine Bestrahlung eines Körpers, insbesondere eines tumorerkrankten Gewebes, mit einem Partikelstrahl.

[0031] Als Partikel werden vornehmlich Ionen wie beispielsweise Protonen, Pionen, Heliumionen, Kohlenstoffionen oder andere Ionensorten eingesetzt. Üblicherweise werden derartige Partikel in einer Partikelquelle **11** erzeugt. Wenn, wie in [Fig. 1](#) dargestellt, zwei Partikelquellen **11** vorhanden sind, die zwei ver-

schiedene Ionensorten erzeugen, kann zwischen diesen beiden Ionensorten innerhalb eines kurzen Zeitintervalls umgeschaltet werden. Dazu wird beispielsweise ein Schaltmagnet **12** verwendet, der zwischen den Ionenquellen **11** einerseits und einem Vorbeschleuniger **13** andererseits angeordnet ist. Z. B. kann hierdurch die Partikeltherapieanlage **10** mit Protonen und mit Kohlenstoffionen gleichzeitig betrieben werden.

[0032] Die von der oder einer der Ionenquellen **11** erzeugten und gegebenenfalls mit dem Schaltmagneten **12** ausgewählten Ionen werden in dem Vorbeschleuniger **13** auf ein erstes Energieniveau beschleunigt. Der Vorbeschleuniger **13** ist beispielsweise ein Linearbeschleuniger (LINAC für engl.: "LINear ACcelerator"). Anschließend werden die Partikel in einen Beschleuniger **15**, beispielsweise ein Synchrotron oder Zyklotron, eingespeist. In dem Beschleuniger **15** werden sie auf hohe Energien, wie sie zur Bestrahlung nötig sind, beschleunigt. Nachdem die Partikel den Beschleuniger **15** verlassen, führt ein Hochenergiestrahlsystem **17** den Partikelstrahl zu einem oder mehreren Bestrahlungsräumen **19**. In einem Bestrahlungsraum **19** werden die beschleunigten Partikel auf einen zu bestrahlenden Körper gerichtet. Je nach Ausgestaltung erfolgt dies von einer festen Richtung (in so genannten "fixed beam"-Räumen) aus oder aber über eine um eine Achse **22** bewegliche rotierbare Gantry **21** von verschiedenen Richtungen aus.

[0033] Die Energie des Partikelstrahls kann bei der hier gezeigten Partikeltherapieanlage beispielsweise dadurch eingestellt werden, dass der Beschleuniger **15** entsprechend angesteuert wird. Eine Feineinstellung der Energie des Partikelstrahls kann gegebenenfalls noch im Behandlungsraum **19** stattfinden, insbesondere unmittelbar bevor der Partikelstrahl auf ein zu bestrahlendes Objekt trifft.

[0034] Die Energie des Partikelstrahls wird durch eine Steuervorrichtung **23** gesteuert, die die entsprechenden Komponenten, mit der die Energie des Partikelstrahls eingestellt wird, ansteuert. Beispielsweise kann die Steuervorrichtung **23** den Beschleuniger **15** ansteuern, so dass die Partikel auf jeweils eine gewünschte Energie beschleunigt werden. Mit der Steuervorrichtung **23** wird folglich die Energie des Partikelstrahls variiert, so dass bei komplexen Bestrahlungsvorgängen eine Bestrahlung schichtweise erfolgen kann, in dem über die Energie des Partikelstrahls die zu bestrahlende Schicht festgelegt wird. Die Steuervorrichtung **23** ist dabei derart ausgebildet, dass eine Reihenfolge, in der die Schichten des Zielvolumens bestrahlt werden, von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang variiert wird.

[0035] Zur Beschleunigung, zur Formung und zur Umlenkung des Partikelstrahls wird in einer Partikel-

therapieanlage eine Vielzahl von Magnetkomponenten **25** eingesetzt. Einige dieser Magnetkomponenten **25**, insbesondere Dipolmagnete, sind in [Fig. 1](#) dargestellt. Zumindest einer dieser Dipolmagnete kann insbesondere supraleitend ausgebildet sein, beispielsweise ein Dipolmagnet der Gantry oder ein Dipolmagnet des Hochenergiestrahlsystems.

[0036] Die Steuervorrichtung **23** steuert dabei ebenso die Magnetkomponenten **25**, durch die der Partikelstrahl geführt wird, so dass das Magnetfeld der Magnetkomponenten **25**, das für eine korrekte Strahlführung erforderlich ist, auf die Energie des Partikelstrahls abgestimmt wird. Diese Steuerung kann direkt oder auch indirekt erfolgen, indem die Steuervorrichtung **23** entsprechende Steuerbefehle an weitere Steuervorrichtungen **27** für die entsprechenden Magnetkomponenten sendet.

[0037] Insbesondere bei supraleitenden Magnetkomponenten, wie beispielsweise supraleitende Dipolmagnete, geht eine derartige Anpassung des Magnetfeldes stets mit einem so genannten AC-Verlust einher. Dieser AC-Verlust ist umso größer, je schneller und stärker eine derartige Anpassung erfolgt.

[0038] Um diesen Effekt zu verringern, ist die Steuervorrichtung **23** derart ausgebildet, dass eine Bestrahlung eines Zielvolumens wie anhand von [Fig. 2](#) bis [Fig. 5](#) nachfolgend näher erläutert erfolgen kann.

[0039] Der anhand der [Fig. 1](#) dargestellte Grundaufbau einer Partikeltherapieanlage **10** ist typisch für viele Partikeltherapieanlagen, kann aber auch hiervon abweichen. Beispielsweise kann eine Partikeltherapieanlage lediglich einen Raum zur Bestrahlung aufweisen. Falls ein Zyklotron zur Beschleunigung von Partikeln eingesetzt wird, kann zusätzlich ein Energie-Selektions-System im Hochenergiestrahlsystem angeordnet werden, mit dem die Energie des Partikelstrahls eingestellt werden kann.

[0040] [Fig. 2](#) zeigt schematisch ein kugelförmiges Zielvolumen **41**, das sich in einem zu bestrahlenden Objekt **43** befindet. Der Pfeil **45** vor dem Objekt **43** zeigt die Strahlrichtung des Partikelstrahls. Eine Einstellung der räumlichen Beziehung zwischen Strahlrichtung des Partikelstrahls und dem zu bestrahlenden Objekt kann beispielsweise über eine Führung des Partikelstrahls mithilfe einer beweglichen Gantry erfolgen. Alternativ und/oder zusätzlich kann die Einstellung auch durch Positionierung des Objekts in Bezug auf den Partikelstrahl erfolgen, beispielsweise mit einer als Roboterarm ausgebildeten Positioniervorrichtung.

[0041] Das zu bestrahlende Zielvolumen **41** weist dabei eine Dimension in Strahlrichtung auf, so dass das Zielvolumen **41** nicht durch einen Partikelstrahl

mit einer definierten Energie vollständig erfasst wird. Um das Zielvolumen **41** dennoch gänzlich zu bestrahlen, wird die Energie des Partikelstrahls sukzessive variiert, so dass jeweils eine Schicht **47** des Zielvolumens **41** bestrahlt wird. Die Form der Schichten **47** kann dabei von einer parallelen Anordnung abweichen. Dies kann beispielsweise durch eine inhomogene Gewebsverteilung innerhalb des zu bestrahlenden Objekts **43** bzw. innerhalb des Zielvolumens **41** bedingt sein. Eine Anpassung der lateralen Ausdehnung des Partikelstrahls an die jeweils zu bestrahlende Schicht **47** kann auf verschiedene Weise erfolgen. Beim Scattering-Verfahren beispielsweise kann ein aufgeweiteter Partikelstrahl mittels Kollimatoren an die Ausdehnung der jeweils zu bestrahlenden Schicht **47** angepasst werden. Beim Scan-Verfahren hingegen kann ein nadelförmiger Partikelstrahl sukzessive auf verschiedene Punkte innerhalb der zu bestrahlenden Schicht **47** gerichtet werden, solange, bis eine Bestrahlung der gesamten Schicht **47** erfolgt ist.

[0042] Während eines Bestrahlungsvorgangs wird zumindest ein Teil der Schichten **47**, vorzugsweise alle Schichten **47**, in einer Richtung – bezogen auf die Einfallsrichtung des Partikelstrahls – bestrahlt. Die römischen Ziffern I bis VI innerhalb der Schichten **47** kennzeichnen dabei die Reihenfolge, in der die Schichten während des anhand von [Fig. 2](#) dargestellten Bestrahlungsvorgangs bestrahlt werden. Zuerst wird die in Strahlrichtung vorne liegende Schicht **47** mit der römischen Ziffer I bestrahlt. Anschließend werden sukzessive immer tiefer liegende Schichten bestrahlt, bis zuletzt die in Strahlrichtung hinten liegende Schicht **47** mit der römischen Ziffer VI bestrahlt wird.

[0043] Anhand der von [Fig. 3](#) ist die Reihenfolge der Schichten **47** dargestellt, wie sie bei dem darauf folgenden Bestrahlungsvorgang bestrahlt werden. Die Reihenfolge der Schichten **47** ist nun variiert, und zwar derart, dass bei dem jetzigen Bestrahlungsvorgang die Schicht **47** mit der römischen Ziffer I zuerst bestrahlt wird. Diese Schicht liegt in Strahlrichtung am weitesten hinten und wurde bei dem vorhergehenden Bestrahlungsvorgang (dargestellt in [Fig. 2](#)) zuletzt bestrahlt. Anschließend werden die Schichten **47**, ausgehend von der in Strahlrichtung hinten liegenden Schicht, sukzessive nach vorne bestrahlt. Zuletzt wird die am weitesten vorne liegende Schicht **47** mit der römischen Ziffer VI bestrahlt. Ebenso wie in [Fig. 2](#) kennzeichnen die römischen Ziffern I bis VI innerhalb der Schichten die Reihenfolge der Bestrahlung der Schichten.

[0044] Die Energie des Partikelstrahls muss somit bei einer Bestrahlung von Schicht **47** zu Schicht **47** und bei einer Bestrahlung von Bestrahlungsvorgang (dargestellt anhand von [Fig. 2](#)) zu Bestrahlungsvorgang (dargestellt anhand von [Fig. 3](#)) lediglich gering-

fügig geändert werden, so dass insbesondere supraleitende Komponenten des Beschleunigers und/oder des Hochenergiestahltransportsystems nur geringfügig an die geänderte Energie des Partikelstrahls angepasst werden müssen. Hierdurch treten Belastungen für Komponenten, insbesondere AC-Verluste, in lediglich geringem Umfang auf.

[0045] Bei dem in [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#) gezeigten Beispiel werden jeweils dieselben Schichten **47** bestrahlt. Dies tritt beispielsweise auf, wenn dasselbe Zielvolumen **41** mehrfach schichtweise abgescannt werden soll. Bei dem in [Fig. 4](#) und [Fig. 5](#) gezeigten Beispiel hingegen wird ein Zielvolumen **41** bei einem Bestrahlungsvorgang von einer Richtung bestrahlt (dargestellt durch den Pfeil **45**) und bei dem nächsten Bestrahlungsvorgang von einer anderen Richtung (dargestellt durch den geänderten Pfeil **45'**). Da das hier gezeigte Zielvolumen **41** länglich geformt ist, sind zur Bestrahlung des Zielvolumens **41** in einer Richtung vier Schichten **47** notwendig ([Fig. 4](#)), während zur Bestrahlung des Zielvolumens in der anderen Richtung sechs weitere Schichten **49** notwendig sind ([Fig. 5](#)).

[0046] Auch hier wird die Reihenfolge der Schichten **47** bzw. **49** von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang variiert. Bei dem anhand von [Fig. 4](#) dargestellten Bestrahlungsvorgang werden die Schichten **47** von vorne nach hinten bestrahlt – bezogen auf die Strahlrichtung. In [Fig. 4](#) ist dies durch die römischen Ziffern I bis IV in den Schichten angedeutet. In [Fig. 5](#) hingegen wird die Reihenfolge der weiteren Schichten **49** umgedreht, so dass die weiteren Schichten **49** von hinten nach vorn bestrahlt werden. Auch hier stehen die römischen Ziffern I bis VI in den weiteren Schichten **49** für die Reihenfolge der Bestrahlung der weiteren Schichten **49**. Die Energie des Partikelstrahls muss bei dem Übergang von einem Bestrahlungsvorgang (dargestellt anhand von [Fig. 4](#)) zu dem anderen Bestrahlungsvorgang (dargestellt anhand von [Fig. 5](#)) lediglich in geringer Weise angepasst werden. Diese Anpassung ist weitaus geringer als eine Anpassung, in die nötig wäre, wenn die Reihenfolge der Bestrahlung der Schichten **47** bzw. **49** bezogen auf die Strahlrichtung von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang belassen würde.

[0047] Die anhand von [Fig. 2](#) bis [Fig. 5](#) erläuterten Bestrahlungsvorgänge können auch variiert werden. So ist es beispielsweise nicht zwingend notwendig, dass bei einem Bestrahlungsvorgang stets alle Schichten des Zielvolumens bestrahlt werden. Beispielsweise kann bei einem Bestrahlungsvorgang jede zweite Schicht bestrahlt werden und in dem darauf folgenden Bestrahlungsvorgang die noch nicht bestrahlten Schichten, diesmal allerdings in umgekehrter Reihenfolge.

[0048] Bei einem Übergang von einem Bestrah-

lungsvorgang zu dem nächsten muss ebenfalls nicht dieselbe Schicht bestrahlt werden, wie es anhand von [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#) erläutert wurde; es können beispielsweise auch benachbarte Schichten bestrahlt werden. Auch in diesem Fall findet nur eine lediglich geringe Variation der Energie des Partikelstrahls statt.

Patentansprüche

1. Steuervorrichtung zur Steuerung eines Bestrahlungsvorganges bei einer Partikeltherapieanlage, die derart ausgebildet ist, dass ein Zielvolumen durch zumindest zwei Bestrahlungsvorgänge bestrahlt wird, wobei bei jedem Bestrahlungsvorgang eine Energie eines Partikelstrahls derart variiert wird, dass das Zielvolumen schichtweise in Schichten, die in Strahlrichtung räumlich hintereinander angeordnet sind, bestrahlt wird, und wobei eine Reihenfolge, in der die Schichten des Zielvolumens bei einem der Bestrahlungsvorgänge bestrahlt werden, – bezogen auf eine Einfallrichtung des Partikelstrahls – von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang variiert wird.

2. Steuervorrichtung nach Anspruch 1, wobei die Steuervorrichtung derart ausgebildet ist, dass die Reihenfolge der Schichten, die bei einem Bestrahlungsvorgang bestrahlt werden, von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang bezogen auf die Einfallrichtung in alternierender Richtung durchlaufen wird.

3. Steuervorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Reihenfolge, in der die Schichten bei einem Bestrahlungsvorgang bestrahlt werden, von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang derart geändert wird, dass beim Übergang von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang eine gleiche Schicht oder benachbarte Schichten bestrahlt werden.

4. Steuervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei bei den zumindest zwei Bestrahlungsvorgängen die gleichen Schichten des Zielvolumens bestrahlt werden.

5. Steuervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei bei den zumindest zwei Bestrahlungsvorgängen unterschiedliche Schichten des Zielvolumens bestrahlt werden.

6. Steuervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei bei den zumindest zwei Bestrahlungsvorgängen eine Einfallrichtung des Partikelstrahls von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang gleich bleibt.

7. Steuervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei bei den zumindest zwei Bestrahlungs-

vorgängen eine Einfallrichtung des Partikelstrahls von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang variiert wird.

8. Partikeltherapieanlage, umfassend
 – eine Partikelquelle zur Erzeugung von Partikeln,
 – einen Beschleuniger zur Beschleunigung der Partikel und zur Bereitstellung eines hochenergetischen Partikelstrahls,
 – eine Hochenergiestrahls-transportsystem zur Führung eines aus den beschleunigten Partikeln geformten Partikelstrahls in einen Bestrahlungsraum,
 – eine Energieeinstellvorrichtung, mit der eine Energie des Partikelstrahls einstellbar ist, und
 – eine Steuervorrichtung zur Steuerung eines Bestrahlungsvorganges nach einem der Ansprüche 1 bis 7, mit der die Energieeinstellvorrichtung steuerbar ist.

9. Partikeltherapieanlage nach Anspruch 8, wobei der Beschleuniger und/oder das Hochenergiestrahls-transportsystem zumindest einen supraleitenden Magneten umfassen.

10. Partikeltherapieanlage nach Anspruch 9, wobei mit der Energieeinstellvorrichtung die Energie des Partikelstrahls in Strahlrichtung vor dem supraleitenden Magneten einstellbar ist, und wobei ein Magnetfeld, das von dem zumindest einen supraleitenden Magneten erzeugt wird, auf die Energie des Partikelstrahls abgestimmt ist.

11. Verfahren zum Steuern der Energie eines Partikelstrahls während einer Bestrahlung eines Zielvolumens, bei der ein Zielvolumen durch zumindest zwei Bestrahlungsvorgänge bestrahlt wird, wobei eine Energie eines Partikelstrahls derart variiert wird,
 – dass bei jedem Bestrahlungsvorgang das Zielvolumen schichtweise in Schichten, die in Strahlrichtung räumlich hintereinander angeordnet sind, bestrahlt wird, und
 – dass eine Reihenfolge, in der die Schichten des Zielvolumens bei einem der Bestrahlungsvorgänge bestrahlt werden, – bezogen auf eine Einfallrichtung des Partikelstrahls – von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang variiert wird.

12. Verfahren nach Anspruch 11, wobei die Reihenfolge der Schichten, die bei einem Bestrahlungsvorgang bestrahlt werden, von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang bezogen auf die Einfallrichtung in alternierender Richtung durchlaufen wird.

13. Verfahren nach Anspruch 11 oder 12, wobei die Reihenfolge, in der die Schichten des Zielvolumens bei einem der Bestrahlungsvorgänge bestrahlt werden, derart variiert wird, dass beim Übergang von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang eine gleiche Schicht oder benachbarte Schichten bestrahlt werden.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 13, wobei bei den zumindest zwei Bestrahlungsvorgängen die gleichen Schichten des Zielvolumens bestrahlt werden.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 13, wobei bei den zumindest zwei Bestrahlungsvorgängen unterschiedliche Schichten des Zielvolumens bestrahlt werden.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 15, wobei bei den zumindest zwei Bestrahlungsvorgängen eine Einfallsrichtung des Partikelstrahls von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang gleich bleibt.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 15, wobei bei den zumindest zwei Bestrahlungsvorgängen eine Einfallsrichtung des Partikelstrahls von Bestrahlungsvorgang zu Bestrahlungsvorgang variiert wird.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 17, wobei die Energie des Partikelstrahls eingestellt wird, bevor der Partikelstrahl durch einen supraleitenden Magneten eines Beschleunigers oder eines Hochenergiestrahlsystems geführt wird.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1

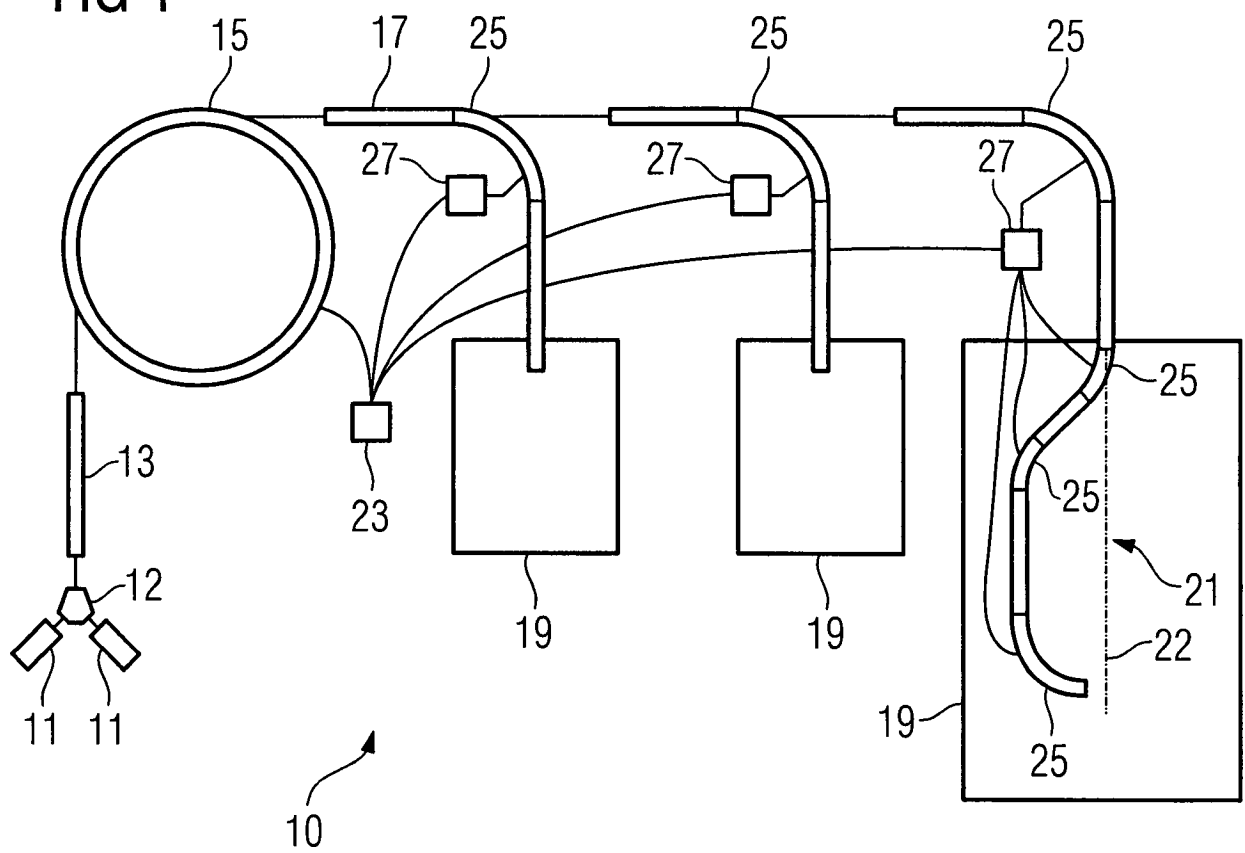


FIG 2

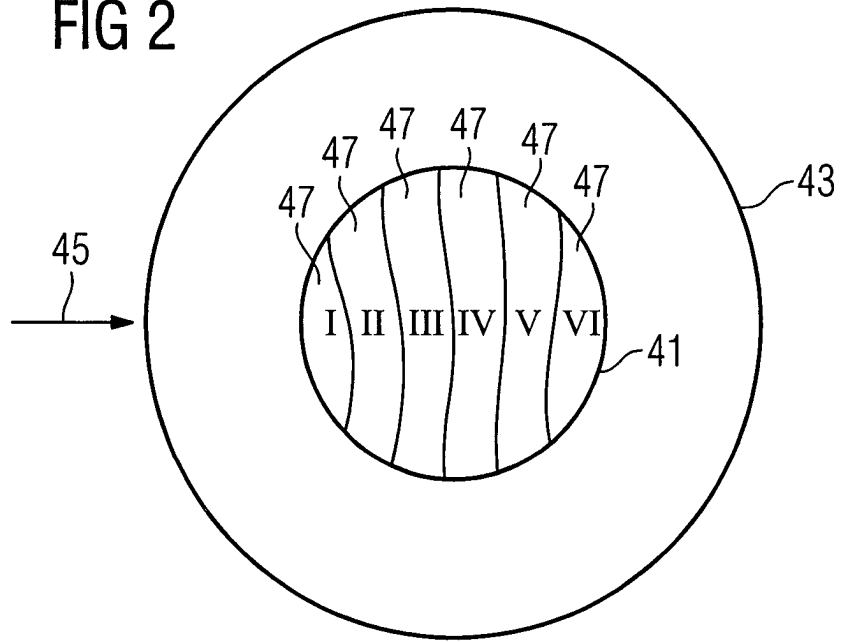


FIG 3

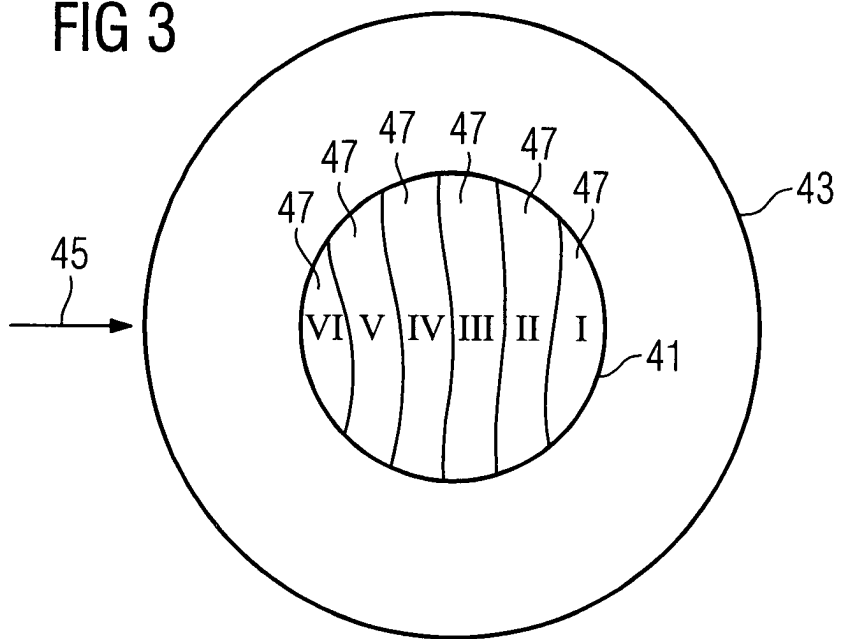


FIG 4

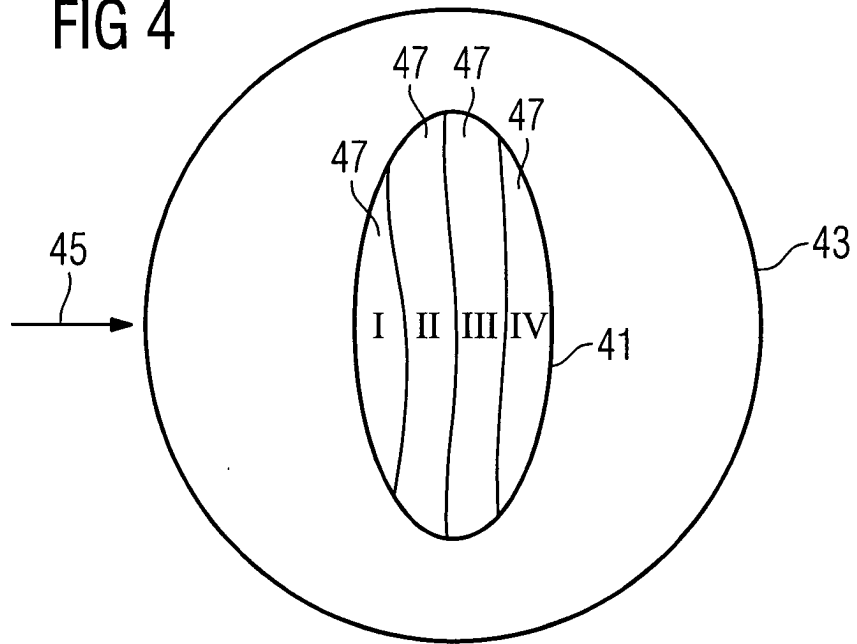


FIG 5

