

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

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
16. Januar 2014 (16.01.2014)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2014/009073 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
A61N 5/10 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2013/061834

(22) Internationales Anmeldedatum:
7. Juni 2013 (07.06.2013)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2012 212 341.5 13. Juli 2012 (13.07.2012) DE

(71) Anmelder: SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT
[DE/DE]; Wittelsbacherplatz 2, 80333 München (DE).

(72) Erfinder: BOHSUNG, Jörg; Rudolf-Hell-Str. 52, 69126 Heidelberg (DE). ELSÄSSER, Thilo; Obere Büch 14, 91054 Buckenhof (DE). GRÖZINGER, Sven Oliver; Albrecht-Dürer-Str. 28, 91353 Hausen (DE). KAWRAKOW, Iwan; BL. 213 vhd G ap., 1336 Ljulin (BG). KIM, Johann; Höglwörther Str. 361, 81379 München (DE). NEUHAUSER, Robert; Max Anderl Str. 80 a, 85375 Neufahrn (DE). RIETZEL, Eike; Einsteinstr. 27, 64331 Weiterstadt (DE). THILMANN, Oliver; Turnerstraße 110, 69126 Heidelberg (DE).

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

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

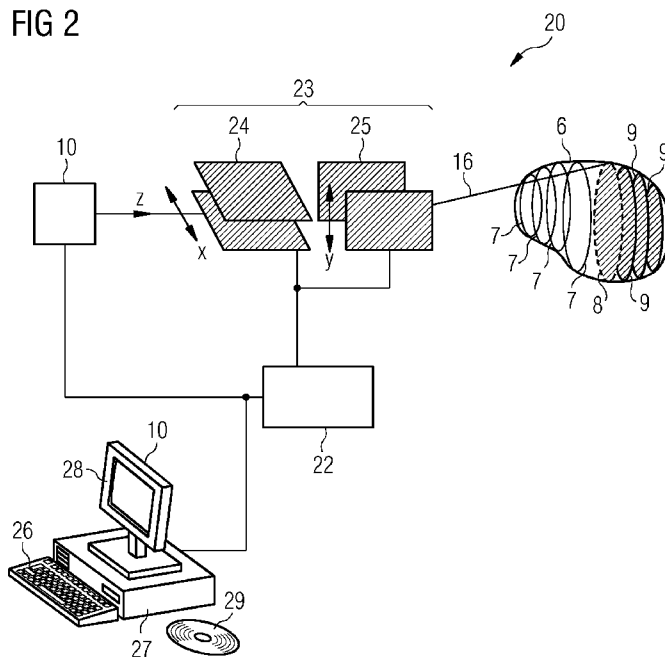
Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR DETERMINING AN IRRADIATION PLAN FOR A PARTICLE IRRADIATION UNIT

(54) Bezeichnung : VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUM BESTIMMEN EINES BESTRAHLUNGSPLANS FÜR EINE PARTIKELBESTRAHLUNGSANLAGE

FIG 2



(57) Abstract: The device relates to a method and a device (10) for determining an irradiation plan for a particle irradiation unit (20). According to the invention, a target volume (6) within a test object (14; 18) is irradiated according to the irradiation plan with a particle beam (16) using the particle irradiation unit (20). The radiation plan is determined in order to apply the energy of the particle beam (16) in the target volume (6) according to a predetermined dose distribution, the target volume (6) and the predetermined dose distribution being specified. In addition, a boundary condition is specified for at least one of the isoenergy layers (7-9) and the irradiation plan is additionally specified such that the boundary condition is met for the at least one isoenergy layer. The boundary condition comprises at least one of the following conditions: • a minimum boundary energy, • a maximum boundary energy, • a minimum grid point number, • a minimum total particle number, • a minimum total dose, • a minimum dose contribution to a total dose to be administered, • a minimum contribution to a target function which is calculated for determining the irradiation plan, and • a minimum dose compensation error, said dose compensation error standing for an error that is due to the non-irradiation of the respective isoenergy layer despite corresponding compensation by the irradiated isoenergy layers.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung (10) zum Bestimmen eines Bestrahlungsplans für eine Partikelbestrahlungsanlage (20). Dabei wird mit der Partikelbestrahlungsanlage (20) abhängig von dem Bestrahlungsplan ein Zielvolumen (6) innerhalb eines Untersuchungsobjekts (14; 18) mit einem Teilchenstrahl (16) bestrahlt. Der Bestrahlungsplan wird bestimmt, um die Energie des Teilchenstrahls (16) gemäß einer vorbestimmten Dosisverteilung in dem Zielvolumen (6) zu applizieren, wobei das Zielvolumen (6) und die vorbestimmte Dosisverteilung vorgegeben sind. Zusätzlich wird eine Randbedingung für mindestens eine der Isoenergieschichten (7-9) vorgegeben und der Bestrahlungsplan zusätzlich derart bestimmt, dass die Randbedingung für die mindestens eine Isoenergieschicht eingehalten wird. Dabei umfasst die Randbedingung zumindest eine von folgenden Bedingungen: • eine minimale Grenzenergie, • eine maximale Grenzenergie, • eine minimale Rasterpunktzahl, • eine minimale Gesamtpartikelanzahl, • eine minimale Gesamtdosis, • ein minimaler Dosisbeitrag einer zu applizierenden Gesamtdosis, • ein minimaler Beitrag zu einer Zielfunktion, welche zur Bestimmung des Bestrahlungsplans berechnet wird, und • ein minimaler Dosiskompensationsfehler, wobei der Dosiskompensationsfehler einen Fehler angibt, welcher durch das Nicht-Bestrahlen der jeweiligen Isoenergieschicht trotz entsprechender Kompensation durch die bestrahlten Isoenergieschichten auftritt.

Beschreibung

Verfahren und Vorrichtung zum Bestimmen eines Bestrahlungsplans für eine Partikelbestrahlungsanlage

5

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung eines Bestrahlungsplans für eine Partikelbestrahlungsanlage und eine entsprechend ausgestaltete Partikelbestrahlungsanlage.

10

Beispielsweise im Rahmen einer Therapieplanung bei der Partikeltherapie wird im Vorfeld ein Bestrahlungsplan erstellt, welcher Steuerparameter zur Bestrahlung eines Untersuchungsobjekts definiert. Mit dem Bestrahlungsplan wird die Bestrahlung eines Gegenstands gemäß bestimmten Vorgaben (z. B. Zielvolumen oder Dosisverteilung) geplant.

15

Die Partikeltherapie ist ein mittlerweile etabliertes Verfahren, mit welchem insbesondere von Tumorerkrankungen befallenes Gewebe bestrahlt wird. Bei der Partikeltherapie werden geladene Partikel, wie beispielsweise Elektronen, Protonen oder Kohlenstoff-Ionen oder andere Ionen oder auch Photonen oder Neutronen auf hohe Energien beschleunigt, zu einem Partikelstrahl geformt und über ein Hochenergie-Transportsystem zu einem (oder mehreren) Bestrahlungsräumen geführt. In einem Bestrahlungsraum wird das Zielvolumen des Behandlungsobjekts mit dem Partikelstrahl bestrahlt, wobei zwangsweise auch Gewebe außerhalb des Zielvolumens bestrahlt wird.

20

25

Wenn bei der Partikeltherapie Beschleuniger mit einer aktiven Energievariation eingesetzt werden, werden für die Bestrahlung des Zielvolumens Teilchenstrahlen unterschiedlicher Energie eingesetzt, wodurch sich so genannte Isoenergieschichten ausbilden, welche innerhalb und außerhalb des Zielvolumens liegen können. In einer Isoenergieschicht werden von dem Teilchenstrahl Teilchen derselben Energie appliziert, so dass die Teilchen des Teilchenstrahls zur Einstellung auf die jeweilige Isoenergieschicht jeweils eine Energie aufweisen,

35

welche sich von der Energie der Teilchen für andere Isoenergieschichten unterscheidet. Dabei werden nach Möglichkeit alle Teilchen einer Isoenergieschicht mit Hilfe eines Spills (d.h. mittels einer einzigen Beschleunigerfüllung) appliziert, da das Laden bzw. Erzeugen eines neuen Spills mehrere Sekunden dauert. Die Unterbrechungszeit zur Erzeugung eines neuen Spills macht insgesamt abhängig von der zu applizierenden Teilchenzahl einen signifikanten Anteil der Gesamtbestrahlungsdauer aus. Um eine möglichst kurze patientenfreundliche Bestrahlung, eine genaue Applikation der Dosis im Zielvolumen sowie einen möglichst wirtschaftlichen Betrieb der Partikelbestrahlungsanlage zu gewährleisten, muss die direkte Bestrahlungszeit (d.h. die Zeit, in der der Patient dem Teilchenstrahl tatsächlich ausgesetzt ist) sowie die Gesamtbestrahlungsdauer (d.h. die Zeit, die der Patient im Bestrahlungsraum verbringt) so kurz wie möglich gehalten werden. Dabei muss jedoch die Qualität des Bestrahlungsplans beachtet werden, welche letztlich vom behandelnden Arzt zu beurteilen ist.

Daher stellt sich die vorliegende Erfindung die Aufgabe, die Gesamtbestrahlungsdauer unter Beibehaltung einer akzeptablen Planqualität bei der Bestimmung eines Bestrahlungsplans für eine Partikelbestrahlungsanlage möglichst kurz zu halten.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch ein Verfahren zum Bestimmen eines Bestrahlungsplans für eine Partikelbestrahlungsanlage nach Anspruch 1, durch eine Vorrichtung zum Bestimmen eines Bestrahlungsplans für eine Partikelbestrahlungsanlage nach Anspruch 8, durch eine Partikelbestrahlungsanlage nach Anspruch 10, durch ein Computerprogrammprodukt nach Anspruch 11 oder durch einen elektronisch lesbaren Datenträger nach Anspruch 12 gelöst. Die abhängigen Ansprüche definieren bevorzugte und vorteilhafte Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung.

Im Rahmen der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren zum (insbesondere automatischen) Bestimmen eines Bestrahlungs-

plans für eine Partikelbestrahlungsanlage bereitgestellt. Dabei wird mit Hilfe der Partikelbestrahlungsanlage gemäß dem Bestrahlungsplan ein Zielvolumen innerhalb eines Untersuchungsobjekts mit einem Partikelstrahl bzw. Teilchenstrahl bestrahlt. Der Bestrahlungsplan wird dabei ausgehend von einem vorgegebenen Zielvolumen und einer vorbestimmten Dosisverteilung (Soll-Dosisverteilung) innerhalb dieses Zielvolumens bestimmt, um anhand des Bestrahlungsplans die Dosis des Teilchenstrahls mit einer hohen Qualität (z. B. möglichst exakt entsprechend der Soll-Dosisverteilung) in dem Zielvolumen, welches mehrere Isoenergieschichten umfasst, zu deponieren oder zu applizieren. Dabei wird eine Randbedingung, welche von dem Bestrahlungsplan einzuhalten ist, für eine oder mehrere der Isoenergieschichten vorgegeben. Diese Randbedingung umfasst dabei eine oder mehrere der im Folgenden aufgelisteten Bedingungen.

1. Minimale Grenzenergie.

Eine zu bestrahlende Isoenergieschicht muss zumindest diese minimale Grenzenergie aufweisen. Anders ausgedrückt werden diejenigen Isoenergieschichten nicht bestrahlt (von dem Bestrahlungsplan nicht berücksichtigt), zu deren Bestrahlung der Teilchenstrahl eine Energie aufweisen würde, welche unterhalb der minimalen Grenzenergie liegt.

Die Bedingung bezüglich der minimalen Grenzenergie kann dabei absolut (d.h. ohne Berücksichtigung der jeweiligen Energie der Isoenergieschichten) oder relativ (d.h. unter Berücksichtigung der jeweiligen Energie der Isoenergieschichten) definiert werden. Wenn beispielsweise die 3 (n) Isoenergieschichten mit der niedrigsten Energie nicht berücksichtigt bzw. bestrahlt werden sollen, wird die minimale Grenzenergie relativ zu der Energie der Isoenergieschicht mit der drittniedrigsten (n-niedrigsten) Energie definiert und liegt z. B. leicht oberhalb der Energie (der Teilchen) der Isoenergieschicht mit der drittniedrigsten (n-niedrigsten) Energie. Dagegen berücksichtigt eine absolute Definition der minimalen Grenzenergie

die jeweilige Energie der Isoenergieschichten nicht, so dass beispielsweise alle Isoenergieschichten unterhalb einer vorbestimmten Energie (z.B. 150 MeV) nicht bestrahlt werden, wobei dieses Kriterium unabhängig davon ist, wie viele oder
5 welcher Prozentsatz der Isoenergieschichten dann nicht bestrahlt werden.

2. Maximale Grenzenergie.

10 Zur Bestrahlung einer Isoenergieschicht darf keine Energie benötigt werden, welche oberhalb der maximalen Grenzenergie liegt. Anders ausgedrückt werden diejenigen Isoenergieschichten nicht bestrahlt (von dem Bestrahlungsplan nicht berücksichtigt), zu deren Bestrahlung der Teilchenstrahl eine Energie
15 aufweisen würde, welche oberhalb der maximalen Grenzenergie liegt.

Die maximale Grenzenergie kann dabei absolut (d.h. ohne Berücksichtigung der jeweiligen Energie der Isoenergieschichten) oder relativ (d.h. unter Berücksichtigung der jeweiligen Energie der Isoenergieschichten) definiert werden. Wenn beispielsweise die 3 (n) Isoenergieschichten mit der höchsten Energie nicht berücksichtigt bzw. bestrahlt werden sollen, wird die maximale Grenzenergie relativ zu der Energie der
20 Isoenergieschicht mit der dritthöchsten (n-höchsten) Energie definiert und liegt leicht unterhalb der Energie (der Teilchen) der Isoenergieschicht mit der dritthöchsten (n-höchsten) Energie. Dagegen berücksichtigt eine absolute Definition der maximalen Grenzenergie die jeweilige Energie der
25 Isoenergieschichten nicht.
30

3. Minimale Rasterpunktanzahl.

Es werden gemäß dieser Bedingung nur Isoenergieschichten bestrahlt, deren Rasterpunktanzahl nicht unterhalb der minimalen Rasterpunktanzahl liegt.
35

Unter einem Rasterpunkt wird dabei ein Punkt in einer zum Teilchenstrahl orthogonalen Ebene durch das Isozentrum verstanden. Der Teilchenstrahl wird jeweils auf einen Rasterpunkt gerichtet, welcher somit die Richtung des Teilchenstrahls bestimmt.

Wenn die Anzahl der Rasterpunkte für eine Isoenergieschicht sehr klein ist, wird die Planqualität des Bestrahlungsplans durch die Bestrahlung dieser Isoenergieschicht nicht signifikant verbessert. Durch diese Bedingung wird die Bestrahlung einer solchen Isoenergieschicht vermieden, wodurch die Bestrahlungszeit eines Patienten vorteilhafterweise verringert werden kann.

4. Minimale Gesamtpartikelanzahl.

Es werden gemäß dieser Bedingung nur Isoenergieschichten bestrahlt, deren Gesamtpartikelanzahl nicht unterhalb der minimalen Gesamtpartikelanzahl liegt.

5. Minimale Gesamtdosis.

Es werden gemäß dieser Bedingung nur Isoenergieschichten bestrahlt, für welche die gesamte in der jeweiligen Isoenergieschicht applizierte Dosis zumindest nicht kleiner als die minimale Gesamtdosis ist.

6. Minimaler Dosisbeitrag einer zu applizierenden Gesamtdosis.

Es werden gemäß dieser Bedingung nur Isoenergieschichten bestrahlt, für welche die in der jeweiligen Isoenergieschicht applizierte Dosis zumindest den minimalen Dosisbeitrag zu der im Zielvolumen insgesamt (für alle Isoenergieschichten) zu applizierenden Gesamtdosis aufweist. Dieser minimale Dosisbeitrag kann dabei ein bestimmter Prozentsatz der im Zielvolumen zu applizierenden Gesamtdosis sein. Dann werden nur diejenigen Isoenergieschichten bestrahlt, bei denen das Ver-

hältnis der in der jeweiligen Isoenergieschicht applizierten Dosis zur im Zielvolumen zu applizierenden Gesamtdosis zumindest diesem Prozentsatz entspricht.

5 Bei einer Bestrahlungsplanung nach dem Stand der Technik kann es bei der Optimierung anhand von Planqualitätskriterien vor-
kommen, dass die für eine Isoenergieschicht optimierte Ge-
samtteilchenzahl so niedrig ist, dass die in der Isoenergie-
schicht applizierte Gesamtdosis vernachlässigbar gegenüber
10 der Gesamtdosis für den vollständigen Bestrahlungsplan ist
oder zumindest einen für die Planqualität vernachlässigbar
kleinen Beitrag liefert. Durch diese Bedingung wird vermie-
den, dass eine solche Isoenergieschicht bestrahlt wird, wo-
durch die Gesamtbestrahlungszeit um 3 bis 5 s (typische Zeit
15 zur Bestrahlung einer Isoenergieschicht) verringert werden
kann.

7. Minimaler Beitrag zu einer Zielfunktion, welche zur Be-
stimmung des Bestrahlungsplans berechnet wird.

20 Für jede Isoenergieschicht kann der Beitrag zu der Zielfunk-
tion bestimmt werden. Gemäß dieser Bedingung werden nur Isoe-
nergieschichten bestrahlt, für welche der Beitrag zu der
Zielfunktion zumindest dem minimalen Beitrag entspricht.

25 8. Minimaler Dosiskompensationsfehler.

Der Dosiskompensationsfehler gibt das Ausmaß eines Fehlers
an, welcher durch das Nicht-Bestrahlen einer bestimmten Isoe-
nergieschicht trotz entsprechender Kompensation durch die be-
30 strahlten Isoenergieschichten auftritt. Gemäß dieser Bedin-
gung werden nur Isoenergieschichten bestrahlt, für welche der
Dosiskompensationsfehler nicht kleiner als der minimale Do-
siskompensationsfehler ist.

35 Damit der erfindungsgemäß bestimmte Bestrahlungsplan die
Randbedingung bzw. eine oder mehrere der vorab genannten Be-
dingungen einhält, werden die entsprechenden Bedingungen ins-

besondere bereits bei der Erstellung des Bestrahlungsplans berücksichtigt. D.h. es wird bereits bei der Erstellung des Bestrahlungsplans darauf geachtet, dass keine Isoenergieschicht die Randbedingung bzw. eine oder mehrere der Bedingungen verletzt.

Es ist allerdings erfindungsgemäß auch möglich, den Bestrahlungsplan in einem ersten Schritt ohne Berücksichtigung der Randbedingung zu erstellen und dann in einem zweiten Schritt alle Isoenergieschichten von der Bestrahlung auszunehmen, welche die vorgegebene Randbedingung nicht erfüllen. Anschließend ist es optional möglich, den Bestrahlungsplan unter Ausschluss der ausgenommenen Isoenergieschichten nachzuoptimieren.

Zur Bestimmung des Bestrahlungsplans wird die Zielfunktion optimiert, wobei jede (bestrahlte) Isoenergieschicht einen bestimmten Beitrag zu dieser Zielfunktion liefert. Der Beitrag der jeweiligen Isoenergieschicht kann sich dabei aus einer Summe aus die Zielfunktion begünstigenden Beiträgen (z. B. Dosisbeitrag zur Gesamtdosis) und aus die Zielfunktion verschlechternden Beiträgen (Zeitdauer der Bestrahlung, Bestrahlung gesunden Gewebes) zusammensetzen. Bei der Überprüfung, ob eine Isoenergieschicht zumindest den minimalen Beitrag zu der Zielfunktion beisteuert, wird somit nur ein begünstigender Beitrag der jeweiligen Isoenergieschicht berücksichtigt. D.h. eine Isoenergieschicht, welche (insgesamt) nur einen die Zielfunktion verschlechternden Beitrag liefert, hat die Bedingung nicht erfüllt.

Erfindungsgemäß ist es dabei möglich, dass für jede Isoenergieschicht eine individuelle Randbedingung vorgegeben wird, so dass jede Isoenergieschicht eine oder mehrere individuell auf die jeweilige Isoenergieschicht zugeschnittene Bedingungen einhalten muss.

Es ist allerdings auch möglich, dass eine oder mehrere der vorab gelisteten Bedingungen für jede Isoenergieschicht gel-

ten, so dass in diesem Fall für alle Isoenergieschichten quasi dieselbe(n) Bedingung(en) gilt/gelten.

Die Bewertung des erfindungsgemäß erstellten Bestrahlungsplans kann durch eines der folgenden Vorgehen vorgenommen werden.

Gemäß einer ersten Ausführungsform zur Bewertung des Bestrahlungsplans kann ein weiterer Bestrahlungsplan erfindungsgemäß bestimmt werden, wobei zur Bestimmung dieses weiteren Bestrahlungsplans für eine oder für mehrere derjenigen Isoenergieschichten, bei welchen gemäß dem zu bewertenden Bestrahlungsplan keine Bestrahlung stattfindet, da die Randbedingung verletzt ist, die Randbedingung aufgehoben wird. Dadurch erfolgt die Bestimmung des weiteren Bestrahlungsplans, ohne eine Einschränkung durch die Randbedingung für die eine oder die mehreren Isoenergieschichten zu berücksichtigen. Mit anderen Worten kann die eine oder können die mehreren Isoenergieschichten, welche gemäß dem zu bewertenden Bestrahlungsplan nicht bestrahlt werden, bei dem weiteren Bestrahlungsplan zur Bestrahlung vorgesehen werden, ohne dass dabei die Randbedingung zu berücksichtigen ist. Zur Bewertung des Bestrahlungsplans wird zum einen eine Planqualität des Bestrahlungsplans erstellt, welche im Wesentlichen abhängig von der erzielten Dosisverteilung ist. Diese Planqualität wird mit einer weiteren Planqualität verglichen, welche für den weiteren Bestrahlungsplan erstellt wird, wobei auch diese weitere Planqualität im Wesentlichen von der von dem weiteren Bestrahlungsplan erzielten Dosisverteilung abhängt. Im Normalfall ist die Bewertung des Bestrahlungsplans umso besser anzusehen, je geringer der Unterschied zwischen der Planqualität und der weiteren Planqualität ist.

Im Extremfall kann bei dieser ersten Ausführungsform der weitere Bestrahlungsplan ohne jegliche Berücksichtigung einer Randbedingung bezüglich irgendeiner Isoenergieschicht erstellt werden.

Anders ausgedrückt wird zur Bewertung des erfindungsgemäß erstellten Bestrahlungsplans gemäß der ersten Ausführungsform überprüft, wie stark sich die Planqualität des Bestrahlungsplans dadurch verschlechtert, dass die Randbedingung einzuhalten ist.

Gemäß einer zweiten erfindungsgemäßen Ausführungsform zur Bewertung des erfindungsgemäß erstellten Bestrahlungsplans kann eine Dosisverteilung bestimmt werden, welche gemäß dem zu bewertenden Bestrahlungsplan appliziert wird. Diese Dosisverteilung wird nun mit der vorbestimmten Dosisverteilung verglichen, wobei das Ergebnis dieses Vergleichs der Bewertung des Bestrahlungsplans entspricht.

Je mehr die für den erfindungsgemäß erstellten Bestrahlungsplan bestimmte Dosisverteilung der vorbestimmten Dosisverteilung entspricht, desto besser sollte die Bewertung des erfindungsgemäß erstellten Bestrahlungsplans ausfallen.

Gemäß einer dritten erfindungsgemäßen Ausführungsform zur Bewertung des erfindungsgemäß erstellten Bestrahlungsplans werden ein oder mehrere Planungsergebnisse verwendet, welche für den Bestrahlungsplan erstellt werden. Dabei wird das Planungsergebnis oder werden die Planungsergebnisse ausgewählt aus folgender Gruppe von Planungsergebnissen:

- Ein Dosis-Volumen-Histogramm, welches für den zu bewertenden Bestrahlungsplan erstellt wird.
- Eine Angabe, wie viel der Dosis laut dem zu bewertenden Bestrahlungsplan im Zielvolumen appliziert wird. Dabei sollte die laut Bestrahlungsplan im Zielvolumen applizierte Dosis der vorgegebenen Dosisverteilung bzw. Soll-Dosisverteilung möglichst gut entsprechen. Dieses Planungsergebnis beinhaltet auch eine Angabe über die Einhaltung von Toleranzgrenzen hinsichtlich der Dosisverteilung innerhalb des Zielvolumens ("dose constraints of planning target volume").
- Eine Angabe, wie viel der Dosis laut dem zu bewertenden Bestrahlungsplan in mindestens einem Risikoorgan des Un-

tersuchungsobjekts appliziert wird. Aus dieser Angabe lässt sich beispielsweise die Information, ob bestimmte Toleranzgrenzen bezüglich der Risikoorgane eingehalten werden, ableiten.

5

Diese Bewertung anhand eines oder mehrerer der vorab aufgeführten Planungsergebnisse kann auch zur Bestimmung der Planqualität des weiteren Bestrahlungsplans eingesetzt werden.

10 Die Zielfunktion, welche zur Bestimmung des Bestrahlungsplans berechnet wird, kann einen Bestrafungsterm umfassen, wobei dieser Bestrafungsterm die Zielfunktion umso mehr verschlechtert, je kleiner ein Abstand gemäß dem Bestrahlungsplan zu der jeweiligen Bedingung ist.

15

Dieser Sachverhalt soll im Folgenden nochmals genauer erläutert werden.

Zur Bestimmung des Bestrahlungsplans wird gemäß einer bevorzugten Ausführungsform mittels eines Optimierungsalgorithmus ein optimaler Funktionswert der Zielfunktion bestimmt. Dabei berücksichtigt die Zielfunktion zum einen den optimalen Funktionswert begünstigende Beiträge bzw. Terme, welche z.B. ein Optimum annehmen, wenn die gemäß dem Bestrahlungsplan applizierte Dosis der Soll-Dosis entspricht. Durch Berücksichtigung des Bestrafungsterms wird der Funktionswert der Zielfunktion und damit die Bewertung des zu erstellenden Bestrahlungsplans umso schlechter, je näher der Bestrahlungsplan bezüglich einer oder mehrerer Isoenergieschichten an durch die einzuhaltende Bedingung definierte Grenze bzw. Schwelle rückt. Der Bestrafungsterm bildet demnach ein Regulativ, um den Bestrahlungsplan derart zu erstellen, dass die vorgegebenen Bedingungen eingehalten werden. Mit anderen Worten wird die vordefinierte Randbedingung bereits in Form des Bestrafungsterms bei dem Optimierungsalgorithmus, mit welchem die Zielfunktion optimiert wird, berücksichtigt.

Zur Vorgabe der Randbedingung für die eine oder für die mehreren Isoenergieschichten kann wie folgt vorgegangen werden.

Es wird ein vorläufiger Bestrahlungsplan bestimmt, um anhand
5 dieses Bestrahlungsplans den Teilchenstrahl gemäß der Soll-Dosisverteilung in dem Zielvolumen zu applizieren. Dabei wird dieser vorläufige Bestrahlungsplan insbesondere ohne Berücksichtigung der Randbedingung erstellt. Die Randbedingung,
welche dann bei der Erstellung des eigentlichen Bestrahlungs-
10 plans einzuhalten ist, wird ausgehend von dem vorläufigen Bestrahlungsplan erstellt.

Indem zur Erstellung der Randbedingung der vorläufige Bestrahlungsplan erstellt wird, kann die Randbedingung (z.B.
15 die minimale Rasterpunktanzahl, die minimale Gesamtpartikelanzahl, die minimale Gesamtdosis, der minimale Beitrag zur Zielfunktion, der minimale Dosiskompensationsfehler) derart bestimmt werden, dass beispielsweise eine vorbestimmte Anzahl (z.B. 10 %) der Isoenergieschichten, welche laut dem vorläufigen Bestrahlungsplan zu bestrahlen sind, die Randbedingung
20 bzw. eine der Bedingungen verletzen.

Im Rahmen der vorliegenden Erfindung wird auch eine Vorrichtung zum Bestimmen eines Bestrahlungsplans für eine Partikel-
25 bestrahlungsanlage bereitgestellt. Die Partikelbestrahlungsanlage bestrahlt dabei abhängig von dem bestimmten Bestrahlungsplan ein Zielvolumen innerhalb eines Untersuchungsobjekts mit einem Teilchenstrahl oder Partikelstrahl. Die Vorrichtung umfasst Eingabemittel, Rechenmittel und Ausgabemittel.
30 Mittels der Eingabemittel werden der Vorrichtung das Zielvolumen, eine vorbestimmte Dosisverteilung (Soll-Dosisverteilung) und eine Randbedingung für eine oder mehrere der Isoenergieschichten vorgegeben. Die Rechenmittel bestimmen den Bestrahlungsplan derart, dass die Teilchen des Teilchenstrahls entsprechend der vorbestimmten Dosisverteilung in
35 dem Zielvolumen, welches mehrere Isoenergieschichten umfasst, abgegeben werden. Der Bestrahlungsplan wird mit den Ausgabemitteln ausgegeben. Die Rechenmittel der erfindungsgemäßen

Vorrichtung bestimmen den Bestrahlungsplan zusätzlich derart, dass die Randbedingung für die eine oder für die mehreren Isoenergieschichten eingehalten wird. Die Randbedingung umfasst dabei mindestens eine derjenigen Bedingungen, welche
5 bezüglich des erfindungsgemäßen Verfahrens vorab aufgelistet worden sind.

Die Vorteile der erfindungsgemäßen Vorrichtung entsprechen im Wesentlichen den Vorteilen des erfindungsgemäßen Verfahrens,
10 welche vorab im Detail ausgeführt sind, so dass hier auf eine Wiederholung verzichtet wird.

Darüber hinaus stellt die vorliegende Erfindung eine Partikelbestrahlungsanlage mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung
15 bereit.

Des Weiteren beschreibt die vorliegende Erfindung ein Computerprogrammprodukt, insbesondere eine Software, welche man in einen Speicher einer programmierbaren Steuereinrichtung bzw.
20 Rechenmittel einer Partikelbestrahlungsanlage laden kann. Mit diesem Computerprogrammprodukt können alle oder verschiedene vorab beschriebene Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens ausgeführt werden, wenn das Computerprogrammprodukt in der Steuereinrichtung läuft. Dabei benötigt das Com-
25 puterprogrammprodukt eventuell Programmmittel, z.B. Bibliotheken und Hilfsfunktionen, um die entsprechenden Ausführungsformen des Verfahrens zu realisieren. Mit anderen Worten soll mit dem auf das Computerprogrammprodukt gerichteten Anspruch insbesondere eine Software unter Schutz gestellt werden,
30 mit welcher eine der oben beschriebenen Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens ausgeführt werden kann bzw. welche diese Ausführungsform ausführt. Dabei kann es sich bei der Software um einen Quellcode (z.B. C++), der noch kompiliert und gebunden oder der nur interpretiert werden
35 muss, oder um einen ausführbaren Softwarecode handeln, der zur Ausführung nur noch in die entsprechenden Rechenmittel bzw. Steuereinrichtung zu laden ist.

Schließlich offenbart die vorliegende Erfindung einen elektronisch lesbaren Datenträger, z.B. eine DVD, ein Magnetband oder einen USB-Stick, auf welchem elektronisch lesbare Steuerinformationen, insbesondere Software (vgl. oben), gespeichert ist. Wenn diese Steuerinformationen (Software) von dem Datenträger gelesen und in Steuermittel bzw. eine Recheneinheit einer Partikelbestrahlungsanlage gespeichert werden, können alle erfindungsgemäßen Ausführungsformen des vorab beschriebenen Verfahrens durchgeführt werden.

Die Auswahl der einzuhaltenden Bedingungen oder die genaue Bestimmung bzw. Definition der einzelnen Bedingung können dabei interaktiv oder mittels einer Konfigurationseinstellung von einem Benutzer vorgegeben werden.

Durch die Vorgabe und Einhaltung der Randbedingung kann die Anzahl der zu bestrahlenden Isoenergieschichten im Vergleich zum Stand der Technik verringert werden. Dadurch kann die Gesamtbestrahlungsdauer deutlich verkürzt werden, was zum größeren Komfort für den Patienten und zu einer Steigerung der Effektivität der Partikelbestrahlungsanlage führt. Die Einführung der vorliegenden Erfindung erfordert vorteilhafterweise keinen Eingriff in die Strahlenapplikation oder in den Beschleuniger selbst, da es sich um eine programmtechnische Ausgestaltung handelt. Durch eine Wählbarkeit der Bedingungen und eine Anzeige der Auswirkungen auf die Qualität des Bestrahlungsplans kann darüber hinaus vorteilhafterweise fallbezogen ein optimaler Kompromiss zwischen einer verkürzten Gesamtbestrahlungsdauer und der Qualität des Bestrahlungsplans gefunden werden.

Die vorliegende Erfindung ist insbesondere zur Erhöhung des Patientendurchsatzes bei der Partikeltherapie geeignet. Selbstverständlich ist die vorliegende Erfindung nicht auf diesen bevorzugten Anwendungsbereich eingeschränkt, da die vorliegende Erfindung prinzipiell überall dort eingesetzt werden kann, wo mit Teilchen oder Partikeln Energie bzw. eine Dosis in einem Zielvolumen appliziert wird.

Im Folgenden wird die vorliegende Erfindung anhand erfindungsgemäßer Ausführungsformen mit Bezug zu den Figuren im Detail beschrieben.

5

Fig. 1 stellt schematisch einen Überblick über den Aufbau einer Partikelbestrahlungsanlage dar.

10 In Fig. 2 ist schematisch dargestellt, wie ein Zielvolumen mittels einer Partikelbestrahlungsanlage bestrahlt wird.

Fig. 3 zeigt einen Ablaufplan der vorliegenden Erfindung.

15 Die in Fig. 1 schematisch dargestellte Partikelbestrahlungsanlage 20 bestrahlt einen auf einer Positionierungsvorrichtung 15 (einem Tisch) liegenden Patienten 14 (siehe Bestrahlungsraum 2') mit einem Partikel bzw. Teilchen 16 umfassenden Strahl, welcher im Folgenden als Partikelstrahl bzw. Teilchenstrahl 16 bezeichnet wird. Mit einem solchen Teilchenstrahl 16 kann beispielsweise ein Tumor des Patienten 14 mit
20 hochenergetischen Partikeln bestrahlt werden. Es ist allerdings auch möglich, die Partikelbestrahlungsanlage 20 zur Bestrahlung eines nicht-lebenden Objektes 18 einzusetzen, wie es im Bestrahlungsraum 2 am Beispiel eines Wasserphantoms 18
25 dargestellt ist.

Als Partikel bzw. Teilchen werden beispielsweise Protonen, Pionen, Heliumionen, Kohlenstoffionen, aber auch Ionen anderer Elemente eingesetzt. Dazu werden die entsprechenden Partikel in einer Partikelquelle bzw. Ionenquelle 1 erzeugt und
30 in einem Vorbeschleuniger 11 (z. B. einem Linearbeschleuniger) auf ein erstes Energieniveau beschleunigt. Anschließend werden die Teilchen in einem Ringbeschleuniger 12 (z. B. einem Synchrotron oder Zyklotron) auf eine zur Bestrahlung benötigte Energie beschleunigt. Der aus dem Ringbeschleuniger 12 austretende Teilchenstrahl wird von einem Hochenergiestrahl-Transportsystem 13 in einen oder mehrere Bestrahlungsräume 2, 2', 2'' transportiert, und dort zur Bestrahlung ei-

nes Zielvolumens eines Patienten 14 eingesetzt. Die Bestrahlung erfolgt von einer festen Richtung aus, so dass der zu bestrahlende Körper 14, 18 vorher raumfest mittels der Positionierungsvorrichtung 15 in dem Bestrahlungsraum 2, 2' angeordnet wird. Die Bestrahlungsräume 2, 2' werden daher auch als so genannte "fixed beam"-Räume bezeichnet. Dagegen existiert im Bestrahlungsraum 2'' eine um eine Achse 17 beweglich angeordnete, insbesondere drehbare Gantry 19, mittels welcher der zu bestrahlende Körper von verschiedenen Richtungen aus (mit verschiedenen Feldern) bestrahlt werden kann. Dazu wird der Teilchenstrahl 16 mit Hilfe einer Strahlführung 21 der Gantry 19 entsprechend auf den zu bestrahlenden Körper gerichtet. In Fig. 1 sind zwei Positionen 5, 5' dargestellt, obwohl mehrere Positionen möglich sind.

In den Bestrahlungsräumen 2, 2' tritt der Teilchenstrahl 16 aus einem Strahlauslass 3, 3' aus und trifft auf den Körper 14 bzw. 18, in welchem sich das zu bestrahlende Zielvolumen befindet. Das Zielvolumen liegt dabei normalerweise in dem Isozentrum 4, 4' des jeweiligen Bestrahlungsraums 2, 2'.

In Fig. 2 ist schematisch ein Zielvolumen 6 dargestellt, welches von einem mittels einer Partikelbestrahlungsanlage 20 erzeugten Teilchenstrahl 16 bestrahlt wird. Die Partikelbestrahlungsanlage 20 umfasst neben einer Bestrahlungsplanungs-
vorrichtung 10 eine Strahlerzeugungsvorrichtung 30, eine Rasterscan-Einrichtung 23 und eine Steuerung 22 für die Rasterscan-Einrichtung 23. Die Rasterscan-Einrichtung 23 weist wiederum eine erste Partikelablenkung 24 und eine zweite Partikelablenkung 25 auf, welche jeweils insbesondere Magnete umfassen. Mit Hilfe der beiden Partikelablenkungen 24, 25 kann der Teilchenstrahl 16 sowohl horizontal als auch vertikal abgelenkt werden, was durch die zueinander senkrecht stehenden Pfeile x, y dargestellt ist. Daher ist die Rasterscan-Einrichtung 23 in der Lage, den Teilchenstrahl 16 auf einen beliebigen Punkt (x_i, y_i) einer Fläche innerhalb der x-y-Ebene zu lenken. Jeder dieser Punkte wird zusammen mit der jeweils eingesetzten Partikelenergie als Scan Spot, Raster-

punkt oder Abtastpunkt bezeichnet. Demnach ist ein Rasterpunkt zum einen durch die Ausrichtung des Teilchenstrahls 16 (x- bzw. y-Richtung) und zum anderen durch seine Partikelenergie bestimmt. Mit anderen Worten existieren für bestimmte x- und y-Koordinaten mehrere Rasterpunkte mit unterschiedlichen Partikelenergien. Die Partikelenergie bestimmt dabei quasi (unter Berücksichtigung des durchstrahlten Körpers, welcher z.B. durch eine CT-Aufnahme ermittelt wird) die Koordinate in der z-Richtung (senkrecht auf der x- bzw. y-Achse), wobei im Allgemeinen gilt, dass die z-Position des Bragg-Peaks umso weiter in Richtung des Teilchenstrahls 16 innerhalb des Zielvolumens 6 liegt, umso größer die Partikelenergie ist. Da allerdings die Eindringtiefe vom Gewebe bzw. Material abhängig ist, welches der Teilchenstrahl 16 durchläuft, gilt obiger Zusammenhang nur für dieselben x- bzw. y-Positionen exakt.

Unter dem Bragg-Peak wird dabei derjenige Punkt bzw. Bereich verstanden, in welchem der Teilchenstrahl entlang seiner Bahn den größten Anteil seiner Dosis appliziert.

Das mit dem Teilchenstrahl 16 zu bestrahlende Zielvolumen 6 wird dabei in Form von Isoenergieschichten 7-9 bestrahlt. In den Rasterpunkten derselben Isoenergieschicht 7-9 werden dabei jeweils Partikel mit derselben Energie appliziert. Unter der Voraussetzung, dass der Teilchenstrahl 16 auf seinem Weg zu der entsprechenden Isoenergieschicht 7-9 ein homogenes Volumen durchläuft, liegen die Isoenergieschichten 7-9 senkrecht zur z-Achse, wie es vereinfachend in Fig. 2 dargestellt ist.

Zur Einstellung des Teilchenstrahls 16 auf eine entsprechende Isoenergieschicht 7-9 (d.h. zur Positionierung des Bragg-Peaks auf einer Isoenergieschicht 7-9) wird den Partikeln des Teilchenstrahls 16 jeweils eine entsprechende Anfangsenergie zugewiesen, indem die Partikel auf eine dieser Anfangsenergie entsprechende Geschwindigkeit beschleunigt werden. Die Anfangsenergie beschreibt dabei die Energie eines Partikels,

welches dieses Partikel vor dem Auftreffen auf das Objekt 14 bzw. 18 aufweist. Zur Bestrahlung derjenigen Isoenergieschicht 7, welche dem Strahlauslass 3, 3' am nächsten liegt (am weitesten links in Fig. 2), werden dazu Partikel mit der niedrigsten Energie eingesetzt, wohingegen zur Bestrahlung derjenigen Isoenergieschicht 9, welche von dem Strahlauslass 3, 3' am weitesten entfernt angeordnet ist (am weitesten rechts in Fig. 2), die Partikel mit der höchsten Energie verwendet werden.

Zur Bestrahlung des gesamten Zielvolumens 6 werden die Isoenergieschichten 7-9 nacheinander bestrahlt, wobei in der Regel mit der Isoenergieschicht 9, welche am weitesten vom Strahlauslass 3, 3' entfernt ist, begonnen wird und dann mit der jeweils benachbarten Isoenergieschicht fortgefahren wird. Um bestimmte Rasterpunkte innerhalb derselben Isoenergieschicht 7-9 mit unterschiedlichen Energien zu bestrahlen, wird insbesondere die Zeitspanne variiert, während welcher der entsprechende Rasterpunkt von dem Teilchenstrahl 16 bestrahlt wird. Je länger der entsprechende Rasterpunkt von dem Teilchenstrahl 16 bestrahlt wird, desto mehr Energie (höhere Dosis) wird in dem entsprechenden Rasterpunkt deponiert.

Bei dem in Fig. 2 dargestellten Zielvolumen 6 wird aktuell die Isoenergieschicht 8 von dem Teilchenstrahl 16 bestrahlt, während die drei Isoenergieschichten 9 bereits bestrahlt worden sind und die weiter links (in Fig. 2) liegenden vier Isoenergieschichten 7 noch auf ihre Bestrahlung warten.

Bevor das Zielvolumen 6 bestrahlt wird, wird ein Bestrahlungsplan erstellt, mittels welchem das Scannen bzw. Abtasten des Zielvolumens 6 mit dem Teilchenstrahl 16 erfolgt. Der Bestrahlungsplan bestimmt dabei insbesondere Steuerparameter zur Steuerung der Partikelbestrahlungsanlage 20. Die Erstellung des Bestrahlungsplans wird dabei mit Hilfe einer Bestrahlungsplanungs Vorrichtung 10 (beispielsweise einem PC) durchgeführt.

Zur Durchführung der eigentlichen Bestrahlung wird der Bestrahlungsplan von der Bestrahlungsplanungs Vorrichtung 10 an die Strahlerzeugungsvorrichtung 30 und die Steuerung 22 der Raster-Scan-Einrichtung 23 weitergeleitet. In Fig. 2 ist die Bestrahlungsplanungs Vorrichtung 10 quasi als Bestandteil der Partikelbestrahlungsanlage 20 dargestellt. Natürlich ist es ebenso gut erfindungsgemäß möglich, dass der von der Bestrahlungsplanungs Vorrichtung 10 erstellte Bestrahlungsplan auf einen Datenträger 29 geladen wird, über welchen dann der Bestrahlungsplan in die Partikelbestrahlungsanlage 20 geladen wird. In diesem Fall müssen die Bestrahlungsplanungs Vorrichtung 10 und die Partikelbestrahlungsanlage 20 nicht miteinander kommunikationstechnisch verbunden sein. Darüber hinaus kann zwischen der Erstellung des Bestrahlungsplans und der anhand des Bestrahlungsplans durchgeführten Bestrahlung ein gewisser Zeitraum, beispielsweise mehrere Tage, liegen.

Zur Erstellung des Bestrahlungsplans benötigt die Bestrahlungsplanungs Vorrichtung 10 die Lage und die Ausmaße des zu bestrahlenden Zielvolumens 6 (z. B. eines zu bestrahlenden Tumors). Darüber hinaus wird bei der Bestrahlung eines Patienten 14 die Beschaffenheit des Gewebes benötigt, welches von dem Teilchenstrahl 16 auf dem Weg zu dem Zielvolumen 6 durchstrahlt wird. Diese Informationen können beispielsweise mittels eines Computer- oder Magnetresonanztomographen ermittelt werden und dann über entsprechende Eingabemittel 26 an die Bestrahlungsplanungs Vorrichtung 10 übermittelt werden. Die Bestrahlungsplanungs Vorrichtung 10 bestimmt mit Hilfe ihrer Rechenmittel 27 ausgehend von diesen Informationen und einer vorbestimmten Dosisverteilung (Soll-Dosisverteilung) den Bestrahlungsplan. Der Bestrahlungsplan gibt dabei insbesondere an, wie viele Partikel einer bestimmten Energie an einem Rasterpunkt zu applizieren sind.

Ein Patient muss während der Bestrahlung fixiert werden, um eine Bewegung des Zielvolumens 6 möglichst auszuschließen. Aus diesem Grund sollte die Bestrahlungsdauer möglichst kurz gehalten werden. Darüber hinaus ermöglicht eine kurze Be-

strahlungsdauer vorteilhafterweise einen höheren Patienten-
durchsatz. Auf der anderen Seite sollte die Dosisverteilung
gemäß Bestrahlungsplan möglichst gut der Soll-Dosisverteilung
entsprechen. Indem erfindungsgemäß die Anzahl der bestrahlten
5 Isoenergieschichten im Vergleich zum Stand der Technik kleiner
ist, da nur Isoenergieschichten bestrahlt werden, welche
die Randbedingung einhalten, weist ein erfindungsgemäß er-
stellter Bestrahlungsplan eine geringere Gesamtbestrahlungs-
dauer auf.

10

In Fig. 3 ist ein Ablaufplan der vorliegenden Erfindung dar-
gestellt.

15

In einem ersten Schritt S1 wird das Zielvolumen und die Soll-
Dosisverteilung vorgegeben, während in einem zweiten Schritt
S2 die von jeder Isoenergieschicht einzuhaltenden Bedingungen
(beispielsweise minimale Rasterpunktanzahl, minimale Gesamt-
partikelanzahl, minimale Gesamtdosis) vorgegeben werden. Aus-
gehend von diesen Vorgaben wird im Schritt S3 ein Bestrah-
20 lungsplan bestimmt.

25

Zur Bewertung dieses in Schritt S3 bestimmten Bestrahlungs-
plans wird im Schritt S4 ein weiterer Bestrahlungsplan er-
stellt. Bei der Erstellung dieses weiteren Bestrahlungsplans
werden für bestimmte derjenigen Isoenergieschichten, welche
laut dem im Schritt S3 bestimmten Bestrahlungsplans nicht be-
strahlt werden, da sie den vorgegebenen Bedingungen nicht ge-
nügen, diese Bedingungen ausgesetzt. Mit anderen Worten wer-
den bei der Erstellung des weiteren Bestrahlungsplans die
30 vorgegebenen Bedingungen bezüglich der bestimmten Isoenergie-
schichten nicht überprüft, so dass der weitere Bestrahlungs-
plan mit einem größeren Freiheitsgrad erstellt wird.

35

Anschließend werden im Schritt S5 sowohl für den Bestrah-
lungsplan als auch für den weiteren Bestrahlungsplan jeweils
eine Planqualität bestimmt, welche insbesondere eine Aussage
darüber trifft, inwieweit die von dem jeweiligen Bestrah-
lungsplan geplante Dosisverteilung der Soll-Dosisverteilung

entspricht. Anhand eines Vergleichs der Planqualität des Bestrahlungsplans und der Planqualität des weiteren Bestrahlungsplans wird der Bestrahlungsplan im Schritt S6 bewertet.

- 5 Durch diesen Vergleich der Planqualitäten kann beispielsweise die Veränderung der dreidimensionalen Dosisverteilung begutachtet werden, wenn laut dem Bestrahlungsplan bestimmte (oder alle) zur Entfernung markierten Isoenergieschichten beispielsweise über eine Benutzerschnittstelle interaktiv wieder
- 10 zugeschaltet werden, indem das Einhalten der Bedingungen für diese Isoenergieschichten ausgesetzt wird. Um die Entscheidung zu erleichtern, welche Isoenergieschichten wieder zugeschaltet werden, kann die Zeitersparnis angezeigt werden, welche bei einem Nicht-Bestrahlen der jeweiligen Isoenergieschicht eingespart wird. Der Vergleich der Planqualitäten des
- 15 Bestrahlungsplans und des weiteren Bestrahlungsplans kann dabei durch eine Anzeige bestimmter Planungsergebnisse (z.B. Dosis-Volumen-Histogramme) unterstützt werden, um dem Benutzer eine weitere Entscheidungshilfe zu geben.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Bestimmen eines Bestrahlungsplans für eine Partikelbestrahlungsanlage (20),

5 wobei mit der Partikelbestrahlungsanlage (20) abhängig von dem Bestrahlungsplan ein Zielvolumen (6) innerhalb eines Untersuchungsobjekts (14; 18) mit einem Teilchenstrahl (16) bestrahlt wird,

10 wobei das Zielvolumen (6) und eine vorbestimmte Dosisverteilung vorgegeben werden,

wobei der Bestrahlungsplan bestimmt wird, um den Teilchenstrahl (16) gemäß der vorbestimmten Dosisverteilung in dem Zielvolumen (6), welches mehrere Isoenergieschichten (7-9) umfasst, zu applizieren,

15 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,

dass eine Randbedingung für mindestens eine der Isoenergieschichten (7-9) vorgegeben wird,

dass der Bestrahlungsplan zusätzlich derart bestimmt wird,

20 dass die Randbedingung für die mindestens eine Isoenergieschicht eingehalten wird, und

dass die Randbedingung zumindest eine von folgenden Bedingungen umfasst:

- eine minimale Grenzenergie,
- eine maximale Grenzenergie,
- 25 • eine minimale Rasterpunktanzahl,
- eine minimale Gesamtpartikelanzahl,
- eine minimale Gesamtdosis,
- ein minimaler Dosisbeitrag einer zu applizierenden Gesamtdosis,
- 30 • ein minimaler Beitrag zu einer Zielfunktion, welche zur Bestimmung des Bestrahlungsplans berechnet wird, und
- ein minimaler Dosiskompensationsfehler, wobei der Dosiskompensationsfehler einen Fehler angibt, welcher durch das Nicht-Bestrahlen der jeweiligen Isoenergieschicht
- 35 trotz entsprechender Kompensation durch die bestrahlten Isoenergieschichten auftritt.

2. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass für jede Isoenergieschicht eine individuelle Randbedingung vorgegeben wird.

5

3. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass für jede Isoenergieschicht bezüglich zumindest einer der Bedingungen dieselbe Bedingung vorgegeben wird.

10

4. Verfahren nach einem der vorgehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass ein weiterer Bestrahlungsplan gemäß dem Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche bestimmt wird,

15 dass zur Bestimmung des weiteren Bestrahlungsplans für mindestens eine bestimmte der Isoenergieschichten, bei welcher gemäß dem Bestrahlungsplan keine Teilchen appliziert werden, da die Randbedingung verletzt ist, die Randbedingung aufgehoben wird, so dass die Bestimmung des weiteren Bestrahlungsplans erfolgt, ohne dass eine Restriktion durch die Randbedingung bezüglich der mindestens einen bestimmten Isoenergieschicht existiert, und

20 dass zur Bewertung des Bestrahlungsplans eine Planqualität des Bestrahlungsplans abhängig von der Dosisverteilung mit einer weiteren Planqualität des weiteren Bestrahlungsplans
25 abhängig von der Dosisverteilung verglichen wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,

30 dass eine Dosisverteilung, welche gemäß dem Bestrahlungsplan appliziert wird, bestimmt wird, und
dass zur Bewertung des Bestrahlungsplans diese Dosisverteilung mit der vorbestimmten Dosisverteilung verglichen wird.

35 6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5,
dadurch gekennzeichnet,
dass zur Bewertung des Bestrahlungsplans zumindest ein Planungsergebnis folgender Gruppe von Planungsergebnissen für

den Bestrahlungsplan und für den weiteren Bestrahlungsplan bestimmt wird, wobei die Gruppe der Planungsergebnisse umfasst:

- ein Dosis-Volumen-Histogramm,
- eine Angabe, wie viel der Dosis laut Bestrahlungsplan im Zielvolumen appliziert wird, und
- eine Angabe, wie viel der Dosis laut Bestrahlungsplan in mindestens einem Risikoorgan des Untersuchungsobjekts appliziert wird.

10

7. Verfahren nach einem der vorgehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Zielfunktion, welche zur Bestimmung des Bestrahlungsplans berechnet wird, einen Bestrafungsterm umfasst, und dass der Bestrafungsterm einen zu optimierenden Funktionswert der Zielfunktion umso mehr verschlechtert, je geringer ein Abstand gemäß dem Bestrahlungsplan zu der jeweiligen Bedingung ist.

15

20

8. Verfahren nach einem der vorgehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein vorläufiger Bestrahlungsplan bestimmt wird, um den Teilchenstrahl (16) gemäß der vorbestimmten Dosisverteilung in dem Zielvolumen (6) zu applizieren, und dass die Randbedingung abhängig von dem vorläufigen Bestrahlungsplan vorgegeben wird.

25

9. Vorrichtung zum Bestimmen eines Bestrahlungsplans für eine Partikelbestrahlungsanlage (20),

30

wobei mit der Partikelbestrahlungsanlage (20) abhängig von dem Bestrahlungsplan ein Zielvolumen (6) innerhalb eines Untersuchungsobjekts (14; 18) mit einem Teilchenstrahl (16) bestrahlt wird,

wobei die Vorrichtung (10) Eingabemittel (26), Rechenmittel (27) und Ausgabemittel (28) umfasst,

35

wobei der Vorrichtung (10) mittels der Eingabemittel (26) das Zielvolumen (6) und eine vorbestimmte Dosisverteilung vorgebar sind,

- wobei die Rechenmittel (27) den Bestrahlungsplan bestimmen, um den Teilchenstrahl (16) gemäß der vorbestimmten Dosisverteilung in dem Zielvolumen (6), welches mehrere Isoenergieschichten (7-9) umfasst, zu applizieren, und
- 5 wobei die Ausgabemittel (28) den Bestrahlungsplan ausgeben, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass der Vorrichtung (10) mittels der Eingabemittel (26) eine Randbedingung für mindestens eine der Isoenergieschichten (7-9) vorgebar sind,
- 10 dass die Rechenmittel (27) den Bestrahlungsplan zusätzlich derart bestimmen, dass die Randbedingung für die mindestens eine Isoenergieschicht (7-9) eingehalten wird, und dass die Randbedingung zumindest eine von folgenden Bedingungen umfasst:
- 15 • eine minimale Grenzenergie,
 • eine maximale Grenzenergie,
 • eine minimale Rasterpunktanzahl,
 • eine minimale Gesamtpartikelanzahl,
 • eine minimale Gesamtdosis,
- 20 • ein minimaler Dosisbeitrag einer zu applizierenden Gesamtdosis,
 • ein minimaler Beitrag zu einer Zielfunktion, welche zur Bestimmung des Bestrahlungsplans berechnet wird, und
 • ein minimaler Dosiskompensationsfehler, wobei der Dosis-
- 25 kompensationsfehler einen Fehler angibt, welcher durch das Nicht-Bestrahlen der jeweiligen Isoenergieschicht trotz entsprechender Kompensation durch die bestrahlten Isoenergieschichten auftritt.
- 30 10. Vorrichtung nach Anspruch 9, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass die Vorrichtung (10) zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1-8 ausgestaltet ist.
- 35 11. Partikelbestrahlungsanlage mit einer Vorrichtung (10) nach Anspruch 9 oder 10.

12. Computerprogrammprodukt, welches ein Programm umfasst und
direkt in einen Speicher einer programmierbaren Steuerein-
richtung einer Partikelbestrahlungsanlage (20) ladbar ist,
mit Programm-Mitteln, um alle Schritte des Verfahrens nach
5 einem der Ansprüche 1-8 auszuführen, wenn das Programm in der
Steuereinrichtung der Partikelbestrahlungsanlage (20) ausge-
führt wird.

13. Elektronisch lesbarer Datenträger mit darauf gespeicher-
10 ten elektronisch lesbaren Steuerinformationen, welche derart
ausgestaltet sind, dass sie bei Verwendung des Datenträgers
(29) in einer Steuereinrichtung einer Partikelbestrahlungsan-
lage (20) das Verfahren nach einem der Ansprüche 1-8 durch-
führen.

15

FIG 1

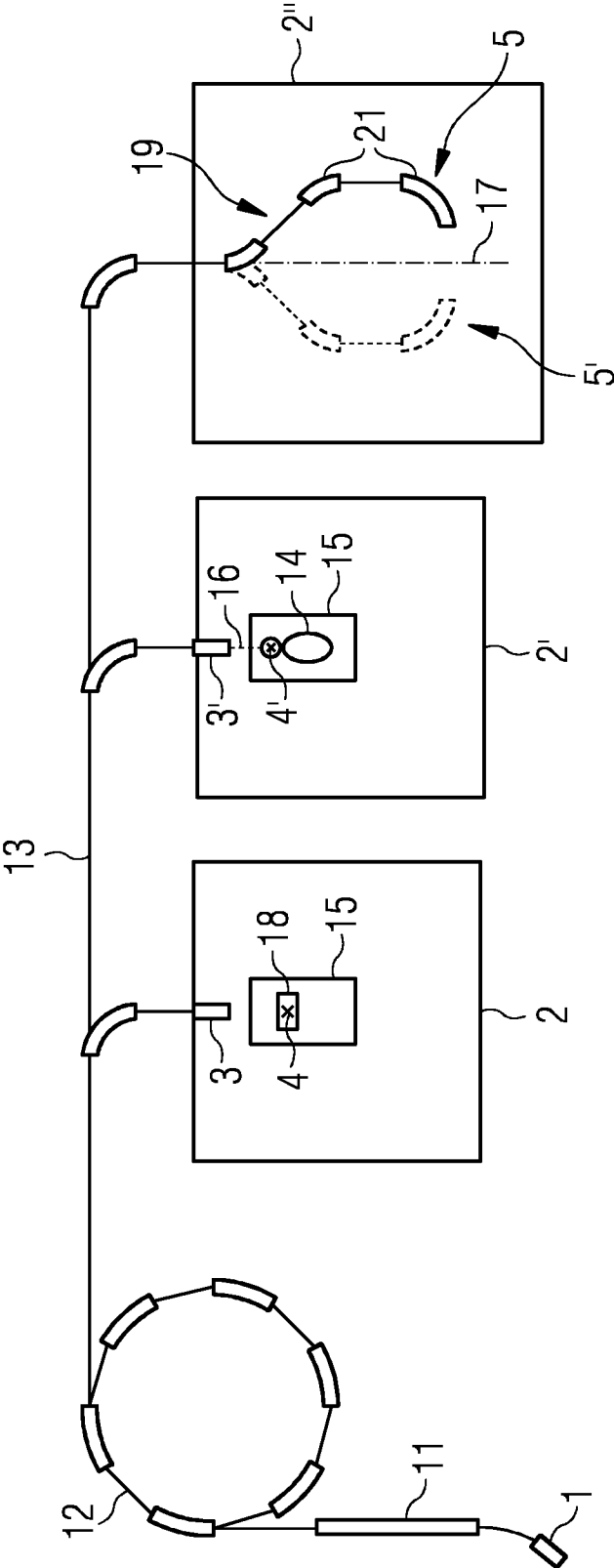


FIG 2

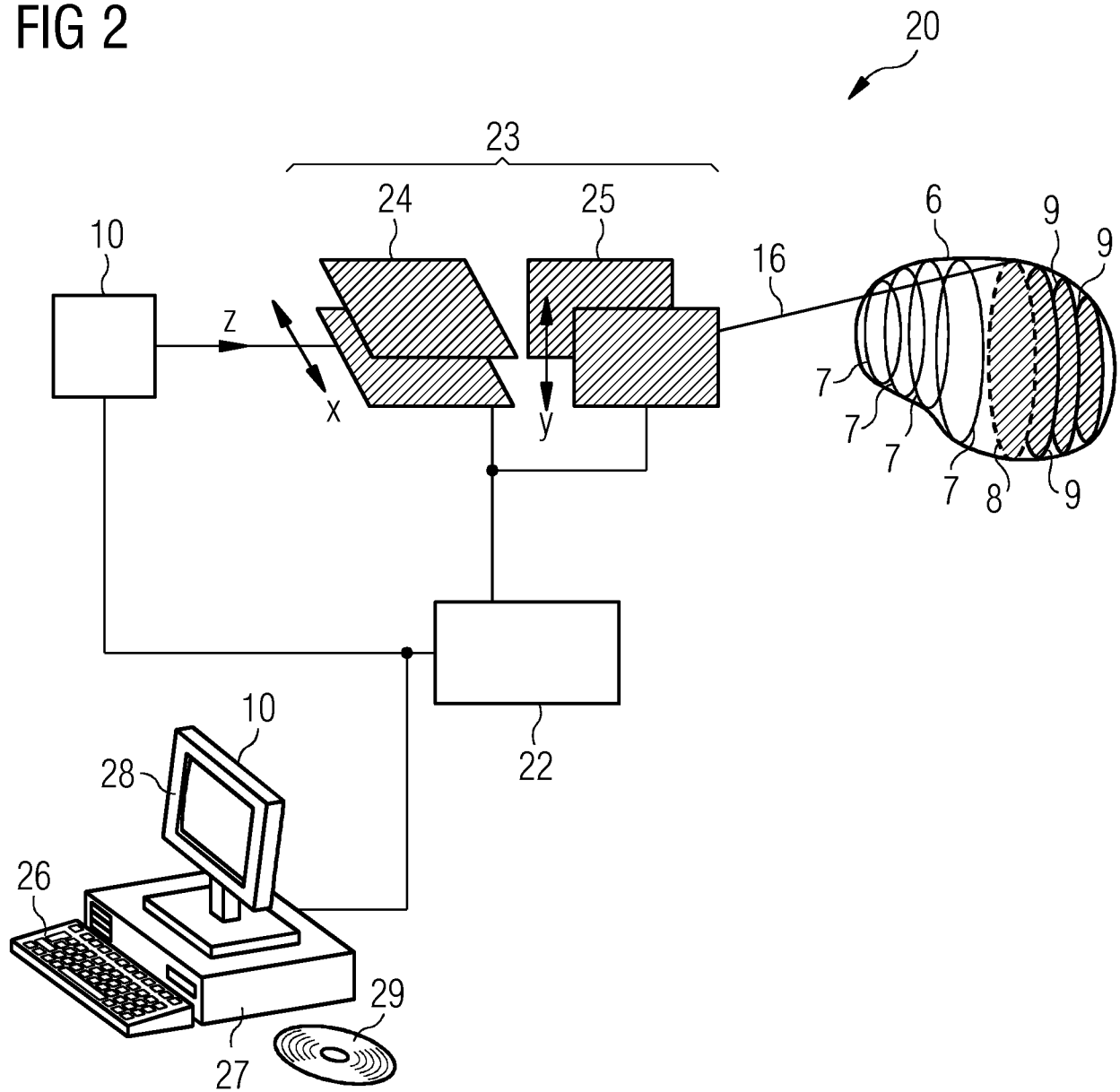
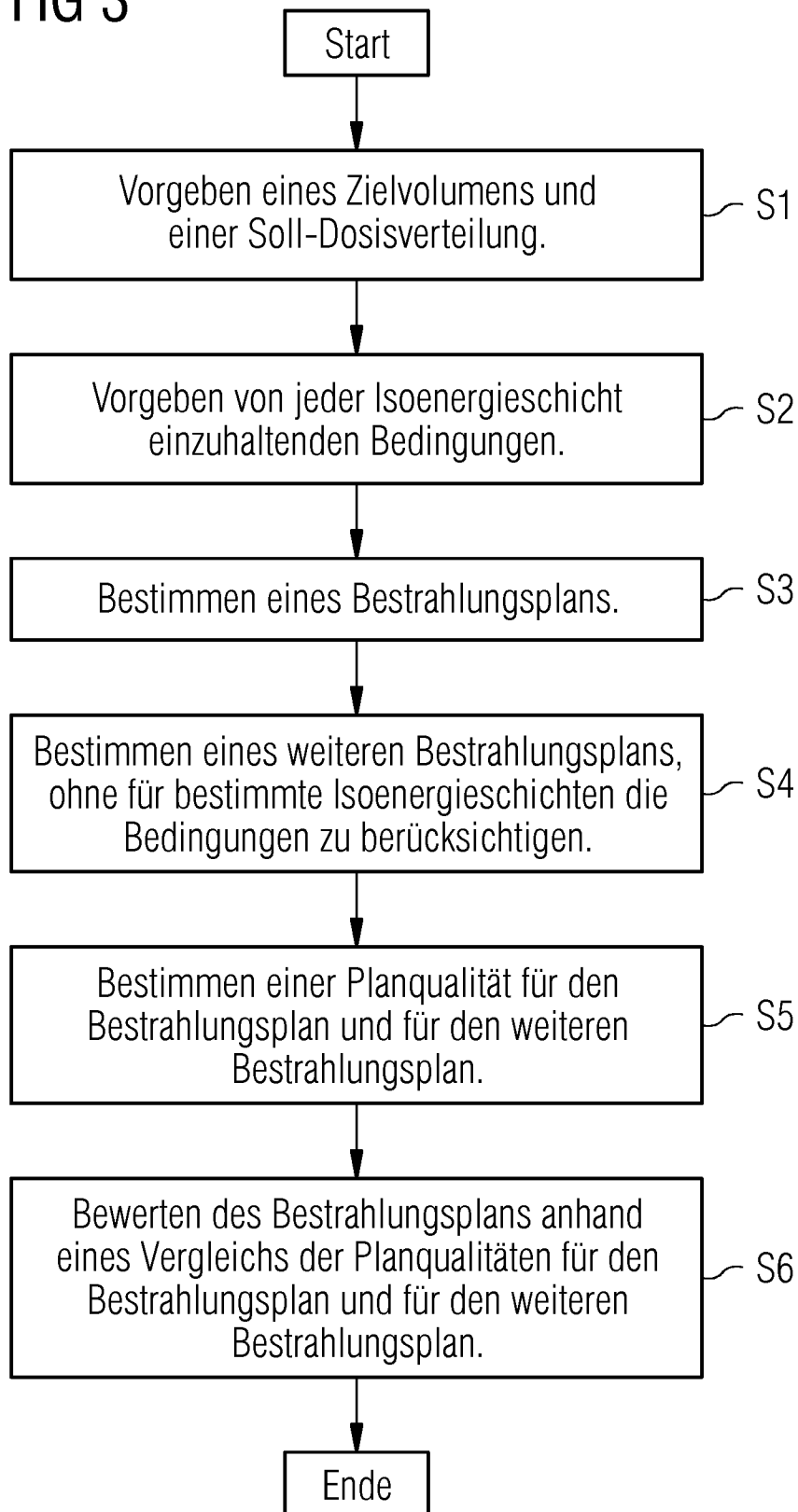


FIG 3



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2013/061834

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. A61N5/10
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

A61N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	DE 10 2008 009765 A1 (GSI HELMHOLTZZENTR SCHWERIONEN [DE]; SIEMENS AG [DE]) 3 September 2009 (2009-09-03)	1-3,7-13
Y	paragraphs [0001], [0003]; claims 6-8;	5,6
A	figures 1-13 paragraphs [0074] - [0081] paragraph [0058] -----	4
X	DE 10 2009 043548 A1 (GSI HELMHOLTZZENTRUM FUER SCHWERIONENFORSCHUNG GMBH [DE]; SIEMENS AG [DE]) 31 March 2011 (2011-03-31)	1
Y	paragraphs [0015], [0050], [0051], [0059], [0066], [0067]; figures 1,2 -----	5,6
A	DE 10 2009 010284 A1 (SIEMENS AG [DE]) 23 September 2010 (2010-09-23) the whole document -----	1-13



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

18 September 2013

Date of mailing of the international search report

26/09/2013

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Gentil, Tamara

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2013/061834

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 102008009765 A1	03-09-2009	DE 102008009765 A1	03-09-2009
		EP 2279027 A1	02-02-2011
		US 2010327188 A1	30-12-2010
		WO 2009103467 A1	27-08-2009

DE 102009043548 A1	31-03-2011	DE 102009043548 A1	31-03-2011
		EP 2482927 A1	08-08-2012
		WO 2011039022 A1	07-04-2011

DE 102009010284 A1	23-09-2010	AT 528045 T	15-10-2011
		DE 102009010284 A1	23-09-2010
		EP 2221088 A1	25-08-2010
		US 2010213394 A1	26-08-2010

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2013/061834

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

INV. A61N5/10

ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

A61N

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	DE 10 2008 009765 A1 (GSI HELMHOLTZZENTR SCHWERIONEN [DE]; SIEMENS AG [DE]) 3. September 2009 (2009-09-03)	1-3,7-13
Y	Absätze [0001], [0003]; Ansprüche 6-8;	5,6
A	Abbildungen 1-13 Absätze [0074] - [0081] Absatz [0058]	4

X	DE 10 2009 043548 A1 (GSI HELMHOLTZZENTRUM FUER SCHWERIONENFORSCHUNG GMBH [DE]; SIEMENS AG [DE]) 31. März 2011 (2011-03-31)	1
Y	Absätze [0015], [0050], [0051], [0059], [0066], [0067]; Abbildungen 1,2	5,6

A	DE 10 2009 010284 A1 (SIEMENS AG [DE]) 23. September 2010 (2010-09-23) das ganze Dokument	1-13



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

18. September 2013

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

26/09/2013

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Gentil, Tamara

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2013/061834

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102008009765 A1	03-09-2009	DE 102008009765 A1	03-09-2009
		EP 2279027 A1	02-02-2011
		US 2010327188 A1	30-12-2010
		WO 2009103467 A1	27-08-2009

DE 102009043548 A1	31-03-2011	DE 102009043548 A1	31-03-2011
		EP 2482927 A1	08-08-2012
		WO 2011039022 A1	07-04-2011

DE 102009010284 A1	23-09-2010	AT 528045 T	15-10-2011
		DE 102009010284 A1	23-09-2010
		EP 2221088 A1	25-08-2010
		US 2010213394 A1	26-08-2010
