



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2005 063 220 A1** 2007.06.28

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2005 063 220.3**

(22) Anmeldetag: **22.12.2005**

(43) Offenlegungstag: **28.06.2007**

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

(71) Anmelder:

**GSI Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH,
64291 Darmstadt, DE**

(72) Erfinder:

**Bert, Christoph, 63739 Aschaffenburg, DE;
Rietzel, Eike, 64289 Darmstadt, DE; Kraft, Gerhard,
64291 Darmstadt, DE**

(74) Vertreter:

**Gleiss Große Schrell & Partner Patentanwälte
Rechtsanwälte, 70469 Stuttgart**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

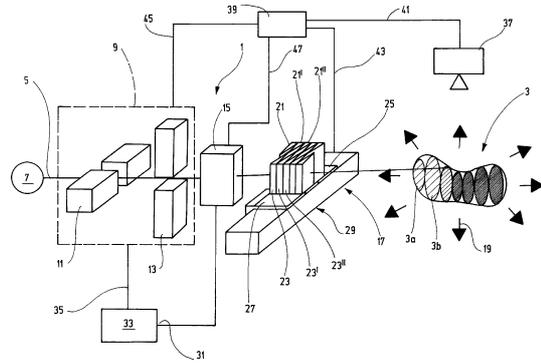
(54) Bezeichnung: **Vorrichtung zum Bestrahlen von Tumorgewebe eines Patienten mit einem Teilchenstrahl**

(57) Zusammenfassung: Es wird eine Vorrichtung zum Bestrahlen von Tumorgewebe (3) eines Patienten mit einem Teilchenstrahl, mit

- einem Beschleuniger (7) zur Erzeugung eines Behandlungsstrahls,
- einer auf den Teilchenstrahl (5) einwirkenden Raster-scaneinrichtung (9) zum scheibenweisen Abtasten des Tumorgewebes (3),
- einem Modulator (17) zum Modulieren der Energie des Teilchenstrahls (5),
- einer Erfassungseinrichtung (37) zum zeitlich aufgelösten Erfassen der Position des Tumorgewebes (3) und mit
- einer ersten Speichereinrichtung zum Ablegen von Daten bezüglich des Tumorgewebes (3), die vor einem Bestrahlungsvorgang ermittelt wurden, und zur Abgabe von diesen Daten an die Raster-scaneinrichtung (9) und an den Modulator (17),

vorgeschlagen. Die Vorrichtung ist gekennzeichnet durch

- ein Modul, das die Daten des Bestrahlungsverlaufs und die Daten der Erfassungseinrichtung erfasst, die während eines Bestrahlungsvorgangs gewonnen werden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Bestrahlen von Tumorgewebe eines Patienten mit einem Teilchenstrahl gemäß Oberbegriff des Anspruchs 1. Die Erfindung betrifft außerdem ein Verfahren zum Kompensieren von Bewegungen von Tumorgewebe eines Patienten während einer Bestrahlung gemäß Anspruch 9.

[0002] Vorrichtungen der hier angesprochenen Art sind bekannt. Sie dienen dazu, bei der Bestrahlung von Tumorgewebe eines Patienten Bewegungen des bestrahlten Zielgebiets auszugleichen. Eine Bewegung des zu bestrahlenden Tumorgewebes tritt insbesondere bei Atmungsbewegungen des Patienten auf. Um den Einfluss von Atembewegungen auf die Dosisdeposition im Tumor zu minimieren, wird meist eine Vergrößerung des Zielvolumens vorgenommen, was zu Belastungen des Patienten führen kann, weil auch gesundes Gewebe bestrahlt wird. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit von Nebenwirkungen. Es existieren bereits Vorschläge zur Reduktion der Dosisbelastung von gesundem Gewebe. Beispielsweise wird vorgeschlagen, die Bewegungsamplitude des zu Bestrahlenden Tumorgewebes durch Kompression der Bauchdecke zu verringern, wodurch die Mobilität des Zwerchfells des Patienten eingeschränkt wird. Auch ist es möglich, die natürliche Atmung durch eine hochfrequente künstliche Atmung (Jet-Ventilation) zu ersetzen. Schließlich kann auch eine hyperoxische Beatmung ins Auge gefasst werden, bei der die Atmung eine Zeit lang stillgelegt werden kann.

[0003] Eine weitere Möglichkeit ist die unterbrochene Bestrahlung (Gating), bei der der Patient normal atmet und der Tumor nur während eines bestimmten Zeitfensters bestrahlt wird. Dies führt dazu, dass die Bestrahlungsdauer nachhaltig erhöht wird.

[0004] Denkbar ist es auch, die Bestrahlungsdosis nicht auf einmal zu applizieren, sondern während einer Anzahl von Zyklen. Diese mehrfache Bestrahlung (rescanning) führt ebenfalls dazu, dass die Bestrahlungsdauer erhöht wird.

[0005] Bekannt ist schließlich auch eine Vorrichtung, die zur Bestrahlung eines Tumorgewebes herangezogen wird und bei der eine Steuereinrichtung vorgesehen ist, mit deren Hilfe eine Lageveränderung des Tumorgewebes während der Bestrahlung ausgeglichen werden kann (DE 10 31 071 A1).

[0006] Es hat sich herausgestellt, dass bei einer Nachführung des Teilchenstrahls bei einer Bewegung des zu bestrahlenden Tumorgewebes Interferenzen auftreten, die das Bestrahlungsergebnis beeinträchtigen. Mit Interferenzen ist hier der Effekt gemeint, der durch eine Bewegung eines bestrahlten Tumorgewebes bei gleichzeitiger Bewegung des Teil-

chenstrahls eintritt: Es ergeben sich in dem zu bestrahlenden Gewebe Bereiche, die im Folgenden auch als Rasterpunkte bezeichnet werden, die während eines Bestrahlungszykluses bereits mit einer Vordosierung beaufschlagt werden, die es in einem späteren Bestrahlungszyklus zu berücksichtigen gilt.

[0007] Aufgabe der Erfindung ist es daher, eine Vorrichtung zu schaffen, die diese Nachteile nicht aufweist.

[0008] Zur Lösung dieser Aufgabe wird eine Vorrichtung vorgeschlagen, die die in Anspruch 1 genannten Merkmale aufweist. Die Vorrichtung umfasst die üblichen Elemente, nämlich einen Beschleuniger zur Erzeugung eines als Behandlungsstrahl bezeichneten Teilchenstrahls, einer Raster-scaneinrichtung, die den Teilchenstrahl in zwei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen ablenkt und scheibenweises Abtasten des Tumorgewebes ermöglicht. Die Vorrichtung weist außerdem einen Modulator auf, der die Energie des Teilchenstrahls verändert, sodass ein Bereich maximaler Dosisbelegung, das sogenannte Bragg-Maximum eines Teilchenstrahls, in unterschiedlichen Tiefen des Tumorgewebes auftritt. Eine Erfassungseinrichtung der Vorrichtung dient dazu, die Position des Tumorgewebes und dessen Verlagerungen zu erfassen. Sie ermöglicht also ein zeitlich aufgelöstes Erfassen der Position des Tumorgewebes. Die mittels der Erfassungseinrichtung gewonnenen Daten werden einer ersten Speichereinrichtung zugeführt. Die Bewegung des Tumors, beispielsweise Atembewegungen eines Patienten, wird vor einem Bestrahlungsvorgang aufgenommen und in dem Speicher abgelegt. Damit ist es möglich, den Teilchenstrahl während eines Bestrahlungsvorgangs so abzulenken, dass er der Bewegung des Tumorgewebes im Wesentlichen folgt.

[0009] Die erfindungsgemäße Vorrichtung zeichnet sich dadurch aus, dass ein Modul vorgesehen ist, das einerseits die Daten des Bestrahlungsverlaufs aufzeichnet. Es werden also die durch die Raster-scaneinrichtung vorgegebenen Positionen des Teilchenstrahls über der Zeit erfasst, außerdem die mittels des Modulators für die Bestrahlung bereitgestellte Energie des Teilchenstrahls. Damit kann bestimmt werden, in welcher Tiefe das Bragg-Maximum eines Teilchenstrahls liegt.

[0010] Andererseits erfasst das Modul Daten einer während der Bestrahlung eines Patienten eingesetzten Erfassungseinrichtung, die über der Zeit die Position des zu bestrahlenden Tumorgewebes erfasst. Dabei ist es möglich, die Position mittels einer Kamera indirekt zu ermitteln, beispielsweise durch auf die Haut des zu bestrahlenden Patienten aufgebrachte Farbmarkierungen oder Lichtquellen, insbesondere Leuchtdioden deren Bewegung während eines Bestrahlungsvorgangs erfasst wird.

[0011] Die Vorrichtung zeichnet sich also dadurch aus, dass bei einem Bestrahlungsvorgang exakte Informationen über den Bestrahlungsverlauf und über die Bewegung des zu bestrahlenden Tumorgewebes vorliegen. Der Zusammenhang zwischen Bestrahlungsverlauf und Bewegung des Tumorgewebes wird durch eine Korrelationseinheit innerhalb des Moduls erfasst. Die Daten der Korrelationseinheit geben Aufschluss darüber, welche Dosierung welchem Tumorbereich beziehungsweise Rasterpunkt zuzuordnen ist.

[0012] Weitere Ausgestaltungen ergeben sich aus den Unteransprüchen.

[0013] Zur Lösung dieser Aufgabe wird auch ein Verfahren zum Kompensieren von Bewegungen von Tumorgewebe eines Patienten während einer Bestrahlung mit einem Teilchenstrahl mit den Merkmalen des Anspruchs 9 gelöst. Bei dem Verfahren wird das Tumorgewebe unter Berücksichtigung von Daten bestrahlt, die in einem Speicher abgelegt sind. Diese sind während eines dem eigentlichen Bestrahlungsvorgang vorgeschalteten Erfassungsvorgangs mittels einer Erfassungseinrichtung gewonnen worden, die der zeitlich aufgelösten Erfassung der Position eines Tumorgewebes, also der Erfassung einer Bewegung des Tumorgewebes, dient.

[0014] Während eines Bestrahlungsvorgangs werden die Daten des Bestrahlungsverlaufs in einem Modul erfasst. Es wird also die scheibenweise Abtastung des Tumorgewebes mittels der Raster-scaneinrichtung und die Modulation der Energie des Teilchenstrahls erfasst.

[0015] Während der Bestrahlung wird außerdem die aktuelle Position des Tumorgewebes über der Zeit von dem Modul erfasst. Schließlich wird durch eine Korrelation der Daten des Bestrahlungsverlaufs und der des Bewegungsverlaufs die Zuordnung der aktuellen Tumorposition zu einem aktuellen Strahlungsverlauf möglich. Man kann also die im Tumor deponierte Dosierung ermitteln.

[0016] Weitere Ausführungsformen des Verfahrens ergeben sich aus den Unteransprüchen.

[0017] Im Zusammenhang mit dem Betrieb der Vorrichtung nach Anspruch 1 und mit der Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 9 werden zur Lösung der genannte Aufgabe ein Verfahren zur Dosisberechnung mit den Merkmalen des Anspruchs 12 und/oder ein Verfahren zur Bestrahlungsplanung mit den Merkmalen des Anspruchs 15 eingesetzt.

[0018] Die Erfindung wird im Folgenden anhand der Zeichnung näher erläutert. Es zeigen:

[0019] [Fig. 1](#) eine Prinzipskizze einer Vorrichtung

zum Bestrahlen von Tumorgewebe eines Patienten und

[0020] [Fig. 2](#) eine Prinzipskizze eines Teils eines Tumors zur Erläuterung des Einflusses einer Bewegung auf einen Bestrahlungsvorgang.

[0021] [Fig. 1](#) zeigt eine Prinzipskizze einer Vorrichtung 1 zum Bestrahlen von Tumorgewebe 3 mittels eines Teilchenstrahls 5, der von einem hier nur angedeuteten Beschleuniger 7 zur Verfügung gestellt wird. Der Teilchenstrahl 5 wird mittels einer Raster-scaneinrichtung 9 sowohl in horizontaler Richtung als auch in vertikaler Richtung abgelenkt, um das Tumorgewebe 3 scheibenweise abzutasten. Dazu ist die Raster-scaneinrichtung 9 hier beispielhaft mit einem ersten Magnetpaar 11 und einem zweiten Magnetpaar 13 versehen. Als Teilchen werden vorzugsweise ¹²C-Teilchen verwendet.

[0022] Der die Raster-scaneinrichtung 9 verlassende Strahl verläuft durch einen Teilchenzähler 15, der beispielsweise als Ionisationskammer ausgebildet sein kann, tritt dann durch einen strahlabwärts angeordneten Modulator 17 und gelangt dann zu dem zu bestrahlenden Tumorgewebe 3. Dieses kann sich, wie durch Pfeile 19 angedeutet, bewegen.

[0023] Der Modulator 17 kann mindestens zwei einander gegenüberliegende, keilförmig ausgebildete Modulatorplatten 21, 23 aufweisen, die mittels eines geeigneten Antriebs aufeinander zu- und voneinander wegbewegt werden können, sodass der Teilchenstrahl 5 durch ein mehr oder weniger dickes Modulatormaterial hindurchtritt, bevor er auf das Tumorgewebe 3 trifft. Vorzugsweise weist der Modulator 17 eine Anzahl von mehreren nebeneinander liegenden Platten 21, 21', 21'' usw. sowie nebeneinanderliegende Modulatorplatten 23, 23', 23'' usw. auf, wobei jeweils die nebeneinanderliegenden Platten 21, 21' usw. einen ersten Antrieb 25 und die nebeneinanderliegenden Platten 23, 23' usw. einem zweiten Antrieb 27 zugeordnet sind, die Teil einer Antriebseinrichtung 29 sind. Modulatoren dieser Art sind bekannt, sodass hier nicht näher auf diese eingegangen wird.

[0024] Mittels der Modulators 17 wird die Energie des Teilchenstrahls 5 moduliert, damit wird die in Richtung des Teilchenstrahls gemessene Position des Bragg-Maximums variiert.

[0025] Mit Hilfe der Raster-scaneinrichtung 9 wird also das Tumorgewebe 3 scheibenweise abgetastet beziehungsweise mit Teilchen des Teilchenstrahls beaufschlagt. Der Modulator 17 dient dazu, die in Richtung des Teilchenstrahls 5 gemessene Position einer Abtastscheibe zu definieren.

[0026] In [Fig. 1](#) sind innerhalb des Tumorgewebes 3 eine Anzahl von Scheiben 3a, 3b usw. angedeutet.

[0027] Die in einem Bereich des Tumors deponierten Dosis des Teilchenstrahls **5** hängt von der Anzahl der im Teilchenstrahl **5** vorhandenen Teilchen ab. Während eines Bestrahlungsvorgangs wird mittels des Teilchenzählers **15** die auf das Tumorgewebe **3** einwirkende Teilchenzahl ermittelt. Bei Erreichen der gewünschten Teilchenzahl wird über eine Leitung **31** ein Signal an eine Steuereinrichtung **33** abgegeben, die über eine Leitung **35** mit der Raster-scaneinrichtung **9** verbunden ist. Wenn mittels des Teilchenzählers **15** die gewünschte Teilchenzahl erfasst wird, erfolgt eine Aktivierung der Raster-scaneinrichtung **9** über die Leitung **35** dergestalt, dass der nächste Rasterpunkt innerhalb des Tumorgewebes **3** angesteuert wird.

[0028] Die Vorrichtung **1** umfasst weiterhin eine Erfassungseinrichtung **37**, außerdem ein Modul **39**, das über eine Leitung **41** mit der Erfassungseinrichtung **37**, über eine Leitung **43** mit dem Modulator **17** und über eine Leitung **45** mit der Raster-scaneinrichtung **9** verbunden ist. Schließlich ist das Modul **39** über eine Leitung **47** mit dem Teilchenzähler **15** verbunden.

[0029] Besonders bevorzugt wird eine Vorrichtung **1**, die zur Erfassung des Bewegungsablaufs eines Tumorgewebes, beispielsweise während der Atmung des Patienten, eine Erfassungsvorrichtung aufweist, die als 4D-CT oder als 4D-MR-Einrichtung ausgebildet ist.

[0030] [Fig. 2](#) zeigt eine Prinzipskizze eines Teils des Tumorgewebes **3** und zwar links gemäß Ziffer **2a** in einer ersten Position und rechts gemäß Ziffer **2b** in einer zweiten verkippten Position.

[0031] Durch Quadrate wird angedeutet, dass das Tumorgewebe **3** rasterförmig bestrahlt wird, wobei in [Fig. 2a](#) Ebenen E1, E2 und E3 usw. dargestellt sind. Innerhalb einer Ebene vorhandene Quadrate sollen einzelne Rasterpunkte angedeutet werden. Der Ausschnitt des Tumorgewebes in [Fig. 2a](#) zeigt die Rasterpunkte R1 bis R5.

[0032] Aus [Fig. 2a](#) ist ersichtlich, dass mittels des Teilchenstrahls **5** ein Rasterpunkt Rx in der Ebene Ex mit einer Dosis beaufschlagt wird. Links von dem Rasterpunkt Rx liegende Rasterpunkte R(x-1), R(x-2) usw. bis R3 werden dabei bereits mit einer Teil-Dosis beaufschlagt. An einem Rasterpunkt tragen also nicht nur die jeweils dort gelegenen Bragg-Maxima zur Dosisdeposition bei, sondern auch Strahlen, deren Bragg-Maxima tiefer im Gewebe liegen.

[0033] [Fig. 2b](#) zeigt das Teilelement des Tumorgewebes **3** in einer gegenüber [Fig. 2a](#) gegen den Uhrzeigersinn verdrehten Position. Gleiche Bezugsziffern dienen dazu, gleiche Teile zu kennzeichnen, die bereits in [Fig. 2a](#) erläutert wurden. Es wird also deut-

lich, dass der hier dargestellte Teil des Tumorgewebes **3** in Ebenen E1, E2, E3 usw. angeordnete Rasterpunkte aufweist, wobei in der Ebene E1 die Rasterpunkte R1 bis R5 liegen.

[0034] Ein Teilchenstrahl **5** trifft hier wiederum auf den Rasterpunkt Rx. Da das Tumorgewebe **3** verkippt ist, durchläuft der Teilchenstrahl **5**, anders als in [Fig. 2a](#), nicht einer Reihe nebeneinanderliegender Rasterpunkte sondern trifft auf Rasterpunkte, die in unterschiedlichen Reihen liegen. Dabei werden in der obersten Reihe des Ausschnittes der Tumorgewebes **3** vier nebeneinanderliegende Rasterpunkte getroffen, nämlich der Rasterpunkt R1 und drei rechts danebenliegende Rasterpunkte. In der zweiten Reihe werden in einem Abstand zum Rasterpunkt R2 liegende Rasterpunkte getroffen und schließlich Rasterpunkte, die in der gleichen Reihe liegen wie der in der Ebene E1 liegender Rasterpunkt E3.

[0035] Die Rasterpunkte Rx, R(x-1) und R(x-2) liegen dem Bragg-Maximum am nächsten, außerdem die Rasterpunkte oberhalb der Rasterpunkte R(x-1) und R(x-2).

[0036] Der Rasterpunkt Ry wird mit einer etwas geringeren Dosis beaufschlagt. Die links davon liegenden Rasterpunkte werden wiederum mit einer geringeren Dosis bestrahlt.

[0037] Aus den [Fig. 2a](#) und [Fig. 2b](#) ist ersichtlich, dass bei der Bestrahlung des Rasterpunkts Rx mittels eines Teilchenstrahls, wobei das Bragg-Maximum des Teilchenstrahls in Rx liegt, unterschiedlich angeordnete Rasterpunkte bereits mit einer Dosierung beaufschlagt werden.

[0038] Im Folgenden wird auf die Funktion der in [Fig. 1](#) dargestellten Vorrichtung zum Bestrahlen von Tumorgewebe eines Patienten und auch das Verfahren zum Kompensieren von Bewegungen von Tumorgewebe eines Patienten während einer Bestrahlung mit einem Teilchenstrahl mittels einer Vorrichtung gemäß [Fig. 1](#) näher eingegangen.

[0039] Das Tumorgewebe **3** eines Patienten wird mittels einer Erfassungseinrichtung, beispielsweise der Erfassungseinrichtung **37**, während einer Bewegung, beispielsweise beim Atmen eines Patienten, erfasst. Die Erfassung der verschiedenen Positionen des Tumorgewebes **3** während eines Bewegungsablaufs erfolgt dergestalt, dass die Bewegung in quasi-statische, vorzugsweise nicht überlappende Bewegungsphasen zerlegt wird. Es findet also eine zeitlich aufgelöste Bewegungserfassung des Tumorgewebes statt.

[0040] Diese Erfassung kann indirekt erfolgen, beispielsweise mittels einer Videokamera, die Farbpunkte auf der Haut eines Patienten oder dort ange-

brachte Lichtquellen erfasst. Vorzugsweise erfolgt die Bewegungserfassung allerdings mittels einer Erfassungseinrichtung, die als 4D-CT (4D-Computertomograph) oder als 4D-MR-Einrichtung (4D-Magnetresonanz-Einrichtung) ausgelegt ist. Es ist also möglich, die örtliche Position des Tumorgewebes während eines Bewegungsablaufes zu bestimmten Zeitpunkten zu erfassen.

[0041] Diese Daten der verschiedenen Bewegungsphasen werden in einer in [Fig. 1](#) nicht dargestellten ersten Speichereinrichtung abgelegt.

[0042] Während eines Bestrahlungsvorgangs werden diese Daten aus der ersten Speichereinrichtung angerufen und dazu verwendet, die Raster-scaneinrichtung **9** und den Modulator **17** so zu steuern, dass der Teilchenstrahl **7** das Tumorgewebe **3** in den verschiedenen Bewegungsphasen bestrahlt.

[0043] Diese Daten werden also dazu verwendet, die Raster-scaneinrichtung **9** so zu steuern, dass eine scheinbar Abtastung des Tumorgewebes **3** erfolgt.

[0044] Die Eindringtiefe des Teilchenstrahls **5** in das Tumorgewebe, also die Ebene **3a**, **3b** usw. innerhalb des Tumorgewebes **3**, in der das Bragg-Maximum des Teilchenstrahls liegt, wird durch Aktivierung des Modulators **17** festgelegt, dessen Modulatorplatten **21**, **21'**, **21''** und **23**, **23'**, **23''** usw. mittels der Antriebe **25** und **27** mehr oder weniger weit aufeinander zu bewegt werden.

[0045] Bei der Bestrahlung eines Rasterpunkts innerhalb des Tumorgewebes **3** wird die Teilchenzahl des Teilchenstrahls **5** mittels des beispielsweise als Ionisationskammer ausgebildeten Teilchenzählers **15** ermittelt. Wenn die gewünschte Teilchenzahl an einem Rasterpunkt erreicht ist, wird die Raster-scaneinrichtung **9** so aktiviert, dass der nächste Rasterpunkt bestrahlt wird. Während eines Bestrahlungsvorgangs wird die aktuelle Position des Patienten bzw. des Tumorgewebes **3** mit Hilfe der Erfassungseinrichtung **37** zeitlich aufgelöst erfasst. Dabei kann hier eine indirekte Erfassung beispielsweise über eine Videokamera oder eine direkte Erfassung mittels 4D-CT oder einer 4D-MR-Einrichtung erfolgen.

[0046] Das Modul **39** erfasst einerseits den laufenden Bestrahlungsvorgang, indem über der Zeit der aktuelle Rasterpunkt innerhalb des Tumorgewebes **3** und die dort eingestrahelte Dosierung erfasst werden. Auf diese Weise ist exakt bekannt, welcher der Rasterpunkte des Tumorgewebes **3** mit welcher Dosis zu welchem Zeitpunkt bestrahlt wurde. Umgekehrt kann damit auch die pro Rasterpunkt eingestrahelte Dosierung, die durch den Bestrahlungsvorgang erreicht wurde, festgestellt werden.

[0047] Andererseits wird während der Bestrahlung die Bewegung des Tumorgewebes **3** ermittelt. Dadurch ist bekannt, welcher tatsächliche Rasterpunkt innerhalb des Körpers des Patienten mit welcher Dosierung in einem bestimmten Zeitpunkt beaufschlagt wurde.

[0048] Die Daten bezüglich des Bestrahlungsvorgangs und die der während des Bestrahlungsvorgangs erfolgenden Bewegung des Tumorgewebes **3** werden miteinander korreliert, um die genannte Aussage über die Dosis an einem Rasterpunkt im Körper der Patienten festlegen zu können.

[0049] Die durch die Korrelation gewonnenen Informationen können in einer zweiten Speichereinrichtung, die hier nicht dargestellt ist, abgespeichert werden. Bei entsprechender Auslegung der ersten Speichereinrichtung können diese Daten auch dort abgelegt werden. Sie liefern ein Protokoll einer Bestrahlung, das durch einen Arzt ausgewertet werden kann. Dieser wird dadurch in die Lage versetzt, den Bestrahlungserfolg zu beurteilen. Beispielsweise kann er feststellen, ob und welche Rasterpunkte eines Tumors mit einer zu geringen Dosis bestrahlt wurden.

[0050] In der Regel werden zur Behandlung von Tumorgewebe mehrere Behandlungsabschnitte, die auch als Fraktionen bezeichnet werden, vorgesehen. Aufgrund der in dem Protokoll niedergelegten Daten kann der Arzt die bei einer nachfolgenden Bestrahlung für die Rasterpunkte des Tumorgewebes zu wählende Dosis neu bestimmen.

[0051] Besonders bevorzugt werden die durch die Korrelation der Daten des Moduls gewonnenen Informationen dazu verwendet, in einen laufenden Bestrahlungsvorgang einzugreifen: Es ist damit möglich, eine Dosisanpassung für mittels einer Raster-scaneinrichtung **9** auf ein Tumorgewebe **3** gerichtete Teilchenstrahlen **5** bei einem bewegten Zielgebiet durchzuführen. Bei einem Bestrahlungsvorgang werden die einzelnen Rasterpunkte des Tumorgewebes mit einem Teilchenstrahl **5** beaufschlagt. Vor dem Bestrahlen eines weiteren Rasterpunkts kann anhand der in dem Modul **39** vorhandenen Daten bestimmt werden, mit welcher Dosis der nächste Rasterpunkt zu beaufschlagen ist. Dabei kann berücksichtigt werden, ob dieser Rasterpunkt bei der Bestrahlung vorangegangener Rasterpunkte möglicherweise bereits mit einer Teil-Dosis beaufschlagt wurde (siehe [Fig. 2](#)). In diesem Fall wird dann die Strahlungs-dosis für diesen vorbestrahlten Rasterpunkt angepasst, in der Regel reduziert, gegebenenfalls auf Null reduziert.

[0052] Bei einer derartigen Ausgestaltung der Vorrichtung **1** werden also die in dem Modul **39** vorhandenen Daten bezüglich des Bestrahlungsvorgangs und die Daten bezüglich der Bewegung des Patienten

ten korreliert und die daraus gewonnenen Informationen unmittelbar zur Beeinflussung der Raster-scaneinrichtung **9** und des Modulators **17** herangezogen.

[0053] Vorzugsweise werden vor einem Bestrahlungsvorgang mögliche Bewegungsphasen des Tumorgewebes erfasst und abgespeichert. Vor der Einleitung des Teilchenstrahls **5** in einen bestimmten Rasterpunkt des Tumorgewebes kann dann anhand eines Korrekturwertes, der aus einem Speicher abgerufen wird, die Dosierung für den nächsten Rasterpunkt bestimmt werden.

[0054] Durch die Verbindung des Moduls **39** mit der Raster-scaneinrichtung **9** und dem Modulator **17** wird hier ein Regelkreis gebildet, der das Verfahren zum Bestrahlen von Tumorgewebe eines Patienten mit einem Teilchenstrahl wesentlich verbessert, weil Bewegungen des Tumorgewebes während einer Bestrahlung kompensiert werden.

[0055] Im Vorfeld der Bestrahlung von Tumorgewebe **3** eines Patienten mittels der hier beschriebenen Vorrichtung **1** werden Verfahren zur Dosisberechnung und zur Bestrahlungsplanung durchgeführt.

[0056] Bei dem Verfahren zur Dosisberechnung für die gescannten Teilchenstrahlen werden bei einem Patienten die verschiedenen Positionen des zu bestrahlenden Tumorgewebes erfasst. Es wird also der Bewegungsablauf des Tumorgewebes **3** ermittelt, um später bei einem Patienten einen Tumor bestrahlen zu können, der nicht statisch ist, sondern der sich während des Bestrahlungsvorgangs, beispielsweise aufgrund der Atmung des Patienten, bewegt.

[0057] Die Bewegung des Tumorgewebes wird in quasi-statische Bewegungsphasen aufgeteilt, die sich vorzugsweise nicht überlappen. Die Bewegung wird also nicht kontinuierlich, sondern bezüglich einzelner separater Bewegungsphasen abgespeichert.

[0058] Für jede Bewegungsphase wird ein Teil-Bestrahlungsplan erstellt, wobei die Dosis für eine Bewegungsphase, während derer das Tumorgewebe **3** mit einem Teilchenstrahl **5** abgescannt wird, aus dem Teilbestrahlungsplan und der zugehörigen Bewegungsphase berechnet wird. Man erhält damit für jede Bewegungsphase sowohl einen Teil-Bestrahlungsplan als auch eine Teil-Dosis.

[0059] Die anatomischen Strukturen in den verschiedenen Bewegungsphasen überlappen sich nicht. Damit können die Einzeldosen pro Bewegungsphase, also die Teil-Dosen nicht ohne weiteres summiert werden. Es ist erforderlich, die den Bewegungsphasen zugeordneten Teil-Dosen auf einen Referenzzustand zu transformieren.

[0060] Erst nach dieser Transformation ist eine Auf-

summierung der Teil-Dosen zu einer Gesamtdosis möglich.

[0061] Um während einer Bestrahlung die Position des Bragg-Maximums definieren zu können, muss dieses aus dem Referenzzustand mittels eines Korrekturwerts berechnet werden. Dieser wird von einer hier nicht dargestellten Rechenkomponente bereitgestellt.

[0062] Dabei ist ein erster Korrekturwert zu berücksichtigen, der aus der Bewegung des Tumorgewebes **3** resultiert. In diesem Fall wird als Korrekturwert ein Vektor oder ein Korrektur-Tripel verwendet. Außerdem muss bei der Bestimmung des Korrekturwerts berücksichtigt werden, dass einzelne Rasterpunkte des Tumorgewebes **3** bei der Bestrahlung eines anderen Rasterpunkts bereits mit einer Teil-Dosis belegt werden. Dieser Dosisbeitrag ist je nach Ablauf der Bestrahlung unterschiedlich. Als Korrekturwert muss für diesen Fall eine Vorbestrahlungsvariable herangezogen werden.

[0063] Mittels des hier beschriebenen Verfahrens ist es möglich, die dem Referenzzustand zuzuordnenden Parameter für den Teilchenstrahl abzuspeichern. Zusätzlich wird eine Wertetabelle in einem Speicher abgelegt, die die Korrekturwerte einerseits bezüglich der Bewegung und andererseits bezüglich der Vorbestrahlung enthält.

[0064] Das der eigentlichen Bestrahlung ebenfalls vorgeschaltete Verfahren zur Bestrahlungsplanung für gescannte Teilchenstrahlen für eine Vorrichtung **1** zum Bestrahlen von Tumorgewebe **3** eines Patienten mit einem Teilchenstrahl **5** umfasst die folgenden Schritte: Wie bereits bei dem Verfahren zur Dosisberechnung werden verschiedene Positionen des Tumorgewebes eines Patienten während eines Bewegungsablaufs, also beispielsweise während der Atmung des Patienten, erfasst. Dabei wird die Bewegung in quasi-statische, vorzugsweise nicht überlappende Bewegungsphasen aufgeteilt.

[0065] Anhand der auf diese Weise ermittelten Bewegungsphasen sowie des zeitlichen Verlaufs der geplanten Bestrahlung werden einzelnen Bewegungsphasen Rasterpunkte eines Teil-Bestrahlungsplans zugeordnet. Dann wird jeder Bewegungsphase eine Teil-Dosis zugeordnet.

[0066] Auch hier ist, wie oben anhand des Verfahrens zur Dosisberechnung beschrieben, eine Transformation der Teil-Dosen auf einen Referenzzustand erforderlich, bevor die Teil-Dosen aufsummiert werden können.

[0067] In einem weiteren Schritt wird die anatomische Lage des aktuellen Rasterpunkts für eine geplante Bestrahlung aus der Kombination eines Ras-

terpunkts im Referenzzustand mit einem Bewegungszustand ermittelt, der dem aktuellen Rasterpunkt zugeordnet ist. Es wird also für jede Kombination aus Rasterpunkt und Bewegungszustand die anatomische Lage des aktuellen Rasterpunkts anhand der oben erwähnten Transformationen verfolgt.

[0068] Für eine Abweichung des aktuellen Rasterpunkts gegenüber einem anhand des Referenzzustandes bestimmten Rasterpunkts wird für den aktuellen Rasterpunkt ein Korrekturwert berechnet. Dieser Korrekturwert wird als Vektor oder als Korrektur-Tripel bezeichnet.

[0069] Diese Korrekturwerte für einen aktuellen Rasterpunkt werden entsprechend dem aktuellen Bewegungszustand in Form einer Tabelle in einem Speicher abgelegt. Damit können die Korrekturwerte bei einer Bestrahlung anhand des hier ermittelten Bestrahlungsplans anhand der dann beobachteten Bewegung des Tumorgewebes angewendet werden.

[0070] Bei dem Verfahren zur Bestrahlungsplanung kann, wie auch bei dem Verfahren zur Dosisberechnung, die anatomische Lage des aktuellen Rasterpunkts mittels eines 4D-CT's oder einer 4D-MR-Einrichtung bestimmt werden. Damit liegen die anatomischen Daten als zeitaufgelöste Daten vor.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zum Bestrahlen von Tumorgewebe (3) eines Patienten mit einem Teilchenstrahl, mit

- einem Beschleuniger (7) zur Erzeugung eines Teilchenstrahls (5),
- einer auf den Teilchenstrahl (5) einwirkenden Raster-scaneinrichtung (9) zum scheibenweisen Abtasten des Tumorgewebes (3),
- einem Modulator (17) zum Modulieren der Energie des Teilchenstrahls (5),
- einer Erfassungseinrichtung (37) zum zeitlich aufgelösten Erfassen der Position des Tumorgewebes (3) und mit
- einer ersten Speichereinrichtung zum Ablegen von Daten bezüglich des Tumorgewebes (3), die vor einem Bestrahlungsvorgang ermittelt wurden, und zur Abgabe von diesen Daten an die Raster-scaneinrichtung (9) und an dem Modulator (17), gekennzeichnet durch,
- ein Modul (39), das die Daten des Bestrahlungsverlaufs und die Daten der Erfassungseinrichtung (37) während eines Bestrahlungsvorgangs erfasst, und
- eine Korrelationseinheit, die die Daten des Bestrahlungsverlaufs und die der Erfassungseinrichtung (37) in zeitliche Beziehung zueinander setzt.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass eine zweite Speichereinrichtung vorgesehen ist, welche die von dem Modul (39) erfassten Daten speichert.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet durch einen Teilchenzähler (15), der der Raster-scaneinrichtung (9) zugeordnet ist.

4. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Modul (39) mit der Raster-scaneinrichtung (9) und/oder dem Modulator (17) zur Ausbildung eines Regelkreises verbunden ist.

5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Speichereinrichtung Daten bezüglich verschiedener Tumorpositionen umfasst.

6. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Vergleichseinrichtung, die den aktuellen Bestrahlungsverlauf mit gespeicherten Strahlungsdaten vergleicht.

7. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Rechenkomponente, die einen Korrekturwert bereitstellt.

8. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Erfassungsvorrichtung als 4D-CT oder als 4D-MR-Einrichtung ausgebildet ist.

9. Verfahren zum Kompensieren von Bewegungen von Tumorgewebe eines Patienten während einer Bestrahlung mit einem Teilchenstrahl mittels einer Vorrichtung, die eine Raster-scaneinrichtung zum scheibenweisen Abtasten des Tumorgewebes und einem Modulator zum Modulieren der Energie des Teilchenstrahls auffasst, insbesondere mittels einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, mit folgenden Schritten:

- Erfassen der aktuellen Position des zu bestrahlenden Tumorgewebes über der Zeit
- Bestrahlen des Tumorgewebes anhand von Daten/Vorgaben, die in einem Speicher abgelegt sind,
- Erfassen der Daten des Bestrahlungsverlaufs in einem Modul,
- Erfassen der aktuellen Position des Tumorgewebes über der Zeit während der Bestrahlung in dem Modul und
- Zuordnung der aktuellen Tumorposition zum aktuellen Bestrahlungsverlauf

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die in dem Modul gewonnenen Daten gespeichert werden.

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, dass die gewonnenen Daten zur Realisierung einer Regelung zur Beeinflussung der Raster-scaneinrichtung und/oder des Modulators verwendet werden.

12. Verfahren zur Dosisberechnung für gescannte Teilchenstrahlen für eine Vorrichtung zum Bestrahlung von Tumorgewebe eines Patienten mit einem Teilchenstrahl mit folgenden Schritten:

- Erfassung der verschiedenen Positionen des Tumorgewebes während eines Bewegungsablaufs,
- Aufteilung der Bewegung in quasistatische, vorzugsweise sich nicht überlappende, Bewegungsphasen,
- Erstellung eines Teil-Bestrahlungsplans eines Referenzbestrahlungsplans pro Bewegungsphase, wobei die Dosis für eine Bewegungsphase aus dem Teil-Bestrahlungsplan und der zugehörigen Bewegungsphase berechnet wird,
- Transformation der den Bewegungsphasen zugeordneten Teildosen entsprechend der Bewegungsphase auf einem Referenzzustand und
- Aufsummierung der Einzeldosen zu einer Gesamtdosis.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass während einer Bestrahlung ein Bragg-Maximum aus dem Referenzzustand mittels eines Korrekturwerts berechnet wird.

14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass als Korrekturwert ein Vektor oder ein Korrektur-Tripel zur Kompensation der Bewegung und/oder eine die Vorbestrahlung berücksichtigende Vorbestrahlungsvariable verwendet werden/wird.

15. Verfahren zur Bestrahlungsplanung für gescannte Teilchenstrahlen für eine Vorrichtung zum Bestrahlen von Tumorgewebe eines Patienten mit einem Teilchenstrahl, mit folgenden Schritten:

- Erfassung der verschiedenen Positionen des Tumorgewebes während eines Bewegungsablaufs,
- Aufteilung der Bewegung in quasistatische, vorzugsweise nicht überlappende, Bewegungsphasen,
- Anhand der Bewegungsphasen sowie des zeitlichen Verlaufs der geplanten Bestrahlung werden einzelnen Bewegungsphasen Rasterpunkte eines Teil-Bestrahlungsplans zugeordnet,
- Berechnung der Teildosis einer Bewegungsphase,
- Transformation der Teildosen auf einen Referenzzustand,
- Aufsummieren der Teildosen,
- Ermittlung der anatomischen Lage des aktuellen Rasterpunkts für eine geplante Bestrahlung aus der Kombination eines Rasterpunkts im Referenzzustand mit einem Bewegungszustand, der dem aktuellen Rasterpunkt zugeordnet ist,
- Berechnung eines Korrekturwerts für den aktuellen Rasterpunkt und
- Abspeichern des Korrekturwerts gemäß des Bewegungszustands in einer in einem Speicher abgelegten Tabelle.

16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass als Korrekturwert ein erster Kom-

pensationswert berechnet wird, der der Bewegung des zu bestrahlenden Tumorgewebes Rechnung trägt, darüber hinaus ein zweiter Korrekturwert, der die Vorbestrahlung eines Rasterpunkts des Tumorgewebes berücksichtigt.

17. Verfahren nach Anspruch 15 oder 16, dadurch gekennzeichnet, dass die anatomische Lage des aktuellen Rasterpunkts mittels eines 4D-CT's oder einer 4D-MR-Einrichtung bestimmt wird.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

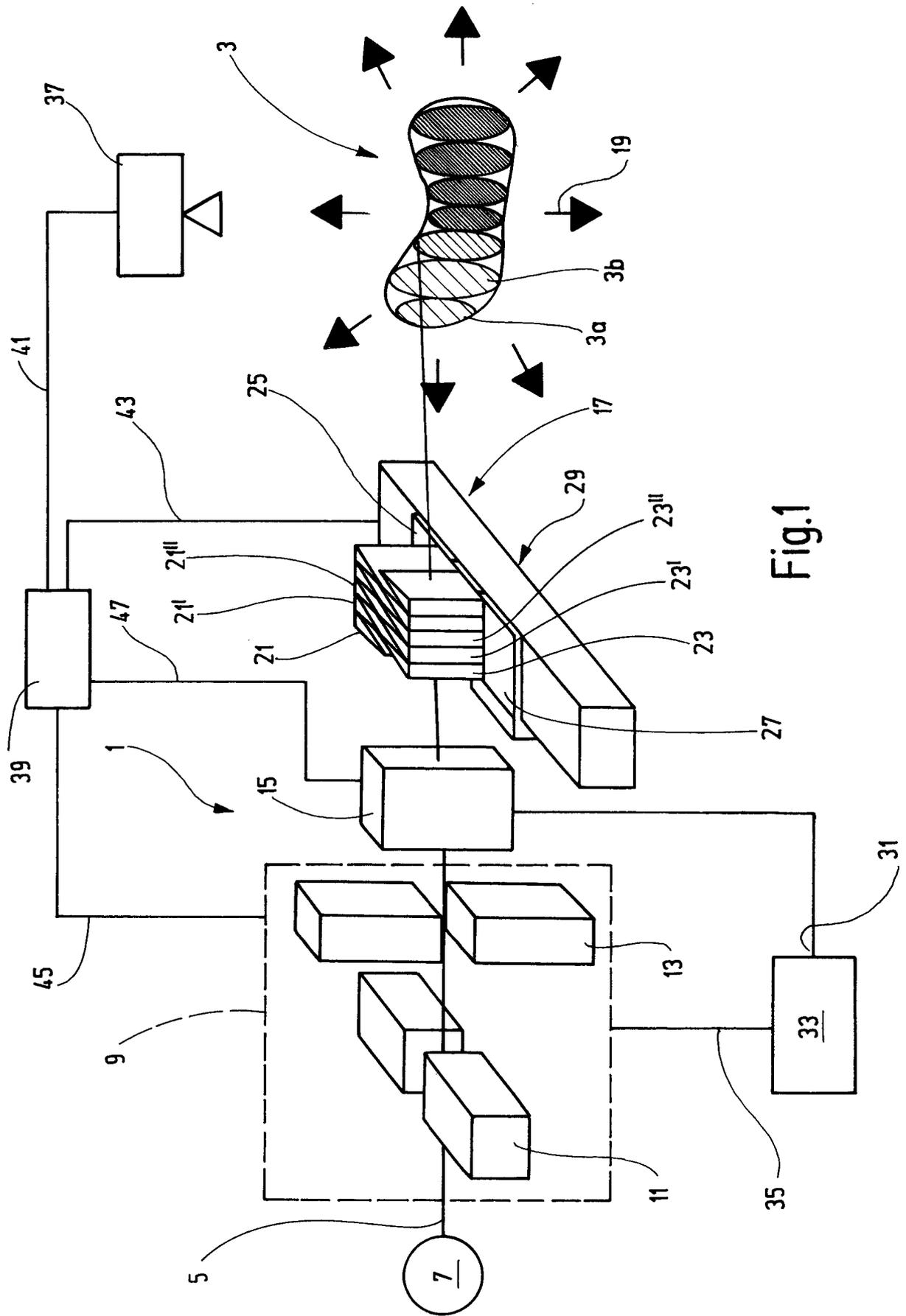


Fig.1

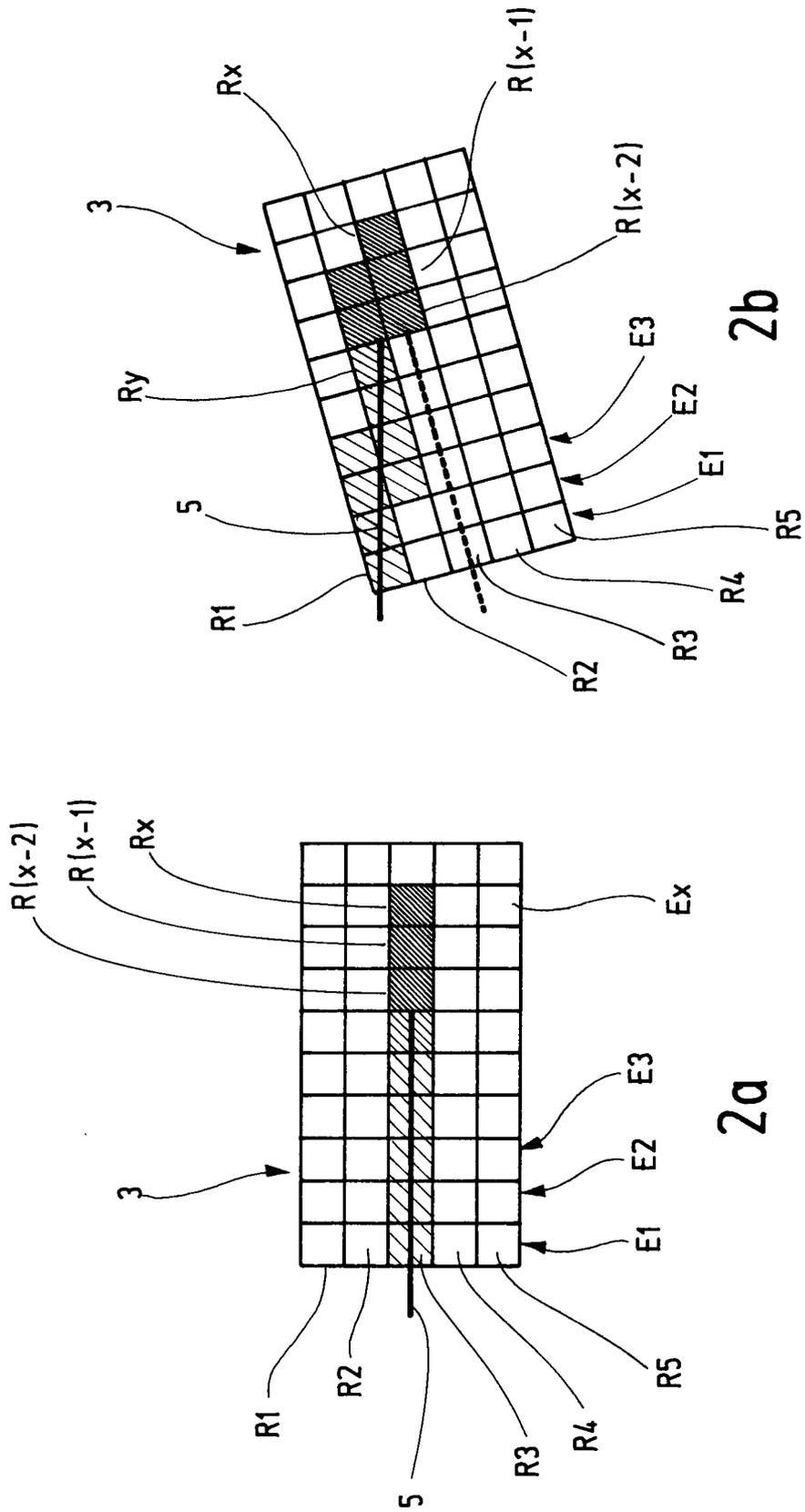


Fig.2