



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2011 052 269.7**

(22) Anmeldetag: **28.07.2011**

(43) Offenlegungstag: **22.03.2012**

(51) Int Cl.: **G21K 1/093 (2011.01)**

A61N 5/10 (2011.01)

G21K 1/02 (2011.01)

(66) Innere Priorität:
10 2010 037 594.2 16.09.2010

(72) Erfinder:
Erfinder wird später genannt werden

(71) Anmelder:
**Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e.V.,
01328, Dresden, DE**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

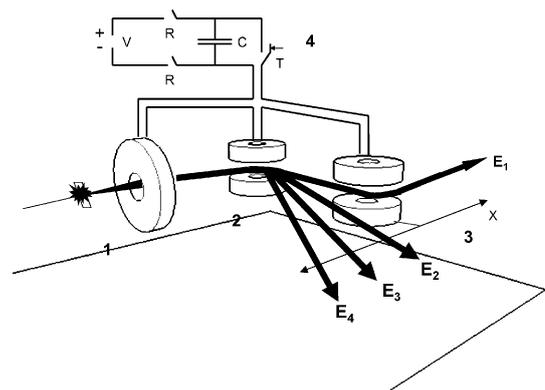
(54) Bezeichnung: **Anordnung zur Erzeugung hochenergetischer Protonenstrahlen und deren Verwendung**

(57) Zusammenfassung: Die Anmeldung beschreibt eine Anordnung zur Erzeugung hochenergetischer Protonenstrahlen unter Verwendung gepulster Hochfeld-Magnetspulen, die u. a. in der lasergetriebenen Protonenstrahltherapie angewendet werden kann.

Wesentlicher Vorteil bei der Bestrahlung mit Protonen gegenüber der Bestrahlung mittels hochenergetischer Photonen ist, dass der Tumor aufgrund des Energieeintrages der Protonen effektiver ausgeschaltet und das den Tumor umgebende gesunde Gewebe effizienter geschützt werden kann. Ein weiterer Vorteil der beschriebenen Anordnung durch den Einsatz hoher gepulster Magnetfelder ist, dass sich Protonenstrahlvorrichtungen unter anderem für medizinische Anwendungen räumlich sehr kompakt als „Tabletop-Geräte“, d. h. unter erheblich reduzierten Investitionsmitteln, produziert werden können.

Der benötigte Energieverbrauch zur Erzeugung eines Magnetpulses beträgt lediglich 10 bis 100 kJ. Bei einem Strompreis von ~ 0,1 EUR/kWh fallen dabei pro Puls Kosten in Höhe von 0,0003 bis 0,003 EUR an.

Ein weiterer Vorteil der erfindungsgemäßen Anordnung ist die vereinfachte Dosierung der Strahlungsintensität und die genauere Fokussierung des zu bestrahlenden Gebiets. Dadurch werden diese Geräte einfacher bedienbar.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die Anmeldung beschreibt eine Anordnung zur Erzeugung hochenergetischer Protonenstrahlen. Die lasergetriebene Protonenstrahltherapie verwendet diese polyenergetischen Protonenstrahlen. Ziel der Protonenlaserstrahltherapie ist die gezielte, dosierte und effektive Bestrahlung des Tumorgewebes.

Stand der Technik

[0002] Chang-hing Ma schlägt in US 7,268,835 B2 bzw. US 7,317,192 A vor, supraleitende Magnete zur Strahlführung zu verwenden. Gleichzeitig werden Energien der Protonenstrahlen und die Strahlführung untersucht.

[0003] Die Protonenstrahltherapie unter Verwendung klassischer Protonenbeschleunigungsanlagen führt zu einer Kombination sensibler medizinischer Behandlungsmethoden im Betrieb großer Forschungseinrichtungen. Die Einrichtung der nach dem Stand der Technik benötigten Beschleunigungsanlagen in medizinischen Zentren erfordert große Strukturmaßnahmen und beträchtliche Investitionen.

Kurzbeschreibung der Erfindung

[0004] Eine kompakte und präzise Protonen-Strahlführung ist vor allem bei kleinen Tumorstrukturen notwendig. Bei der Behandlung großer Tumorstrukturen scheint die Verwendung eines polyenergetischen Protonenstrahls erforderlich, um eine zeitgleiche Ausschaltung des gesamten Tumorumfanges zu erreichen. Für diesen Fall muss der Protonenstrahl räumlich differenziert sein, damit die Protonen mit optimaler Energie an die jeweilige Absorptionsposition gelenkt werden. Diese Anforderungen an die Strahlführung und die Steuerung der Energie ist mit den Anordnungen und Verfahren des bisherigen Standes der Technik nicht mit der erforderlichen Genauigkeit möglich.

Technische Aufgabe

[0005] Aufgabe der Erfindung ist die Angabe einer Anordnung zur Erzeugung hochenergetischer Protonenstrahlen, die speziell in der lasergetriebenen Protonenstrahltherapie angewendet werden kann, die die Mängel des Standes der Technik beseitigt.

Technische Lösung

[0006] Die Aufgabe wird gelöst durch eine Anordnung, die gepulste Hochfeld-Magnet-Spulen verwendet und im Anspruch 1 beschrieben wird. Vorteilhafte Ausführungen sind in den Unteransprüchen angegeben.

[0007] Die erfindungsgemäße Anordnung erlaubt eine wirkungsvolle kompakte und präzise Protonenstrahlführung und erzeugt gleichzeitig einen räumlich differenzierten hochenergetischen Protonenstrahl.

Vorteilhafte Wirkungen

[0008] Wesentlicher Vorteil bei der Bestrahlung mit Protonen gegenüber der Bestrahlung mittels hochenergetischer Photonen ist, dass der Tumor aufgrund des Energieeintrages der Protonen effektiver ausgeschaltet und das den Tumor umgebende gesunde Gewebe effizienter geschützt werden kann.

[0009] Ein weiterer Vorteil der beschriebenen Anordnung durch den Einsatz hoher gepulster Magnetfelder ist, dass sich Protonenstrahlvorrichtungen unter anderem für medizinische Anwendungen räumlich sehr kompakt als „Tischgeräte“ („tabletop-device“), d. h. unter erheblich reduzierten Investitionsmitteln, produziert werden können.

[0010] Der benötigte Energieverbrauch zur Erzeugung eines Magnetpulses beträgt lediglich 10 bis 100 kJ. Bei einem Strompreis von ~ 0,1 EUR/kWh fallen dabei pro Puls Kosten in Höhe von 0,0003 bis 0,003 EUR an.

[0011] Ein weiterer Vorteil der erfindungsgemäßen Anordnung ist die vereinfachte Dosierung der Strahlungsintensität und die genauere Fokussierung des zu bestrahlenden Gebiets. Dadurch werden diese Geräte einfacher bedienbar.

Kurze Beschreibung der Zeichnungsfiguren

[0012] Die Erfindung wird mit Hilfe von Abbildungen beschrieben. [Abb. 1](#) zeigt den prinzipiellen Aufbau. [Abb. 2](#) zeigt die Regelung der Energie des Protonenstrahls durch Variation der magnetischen Flussdichte der Spulen. [Abb. 3](#) und [Abb. 4](#) zeigen mögliche Ausführungsformen der Spulen und [Abb. 5](#) zeigt eine mögliche Ausführung einer Anordnung zur Erzeugung hochenergetischer Protonenstrahlen und deren Verwendung.

Beschreibung der Ausführungsarten

[0013] Protonen können im Vergleich zu hochenergetischen Photonen mittels Magnetfelder umgelenkt und selektiert werden. Das Prinzip basiert auf der Lorentzkraft und entspricht der Wirkungsweise eines Massenspektrometers. Zur Protonenstrahltherapie werden allerdings hochenergetische Protonen im Energiebereich von 10 bis 200 MeV benötigt, die sich unter nichtrelativistischer Vereinfachung folgender Beziehungen

$$r = m_p v_p / eB = (2Um_p/e)^{1/2} / B \quad \text{mit } v_p = (2eU/m_p)^{1/2}$$

entsprechend in kleineren Feldern nur geringfügig ablenken lassen. Protonen einer Energie von 10 MeV würden beispielsweise bei magnetischen Flussdichten $B = 1 \text{ T}$ (übliche Größenordnung für die Führung von Elektronen) einen Umlenkradius von $r = 46 \text{ cm}$ erfahren. Damit würden Strahlführungsmagnete beträchtlicher bzw. unrealistischer Größe benötigt.

[0014] Die hohen Geschwindigkeiten der Protonen (siehe Tab. 1) erfordern starke Magnetfelder um Strahlradian und Maße der Magnete auf vernünftige Größe zu reduzieren. Die Amplitude des Magnetfeldes ist so gewählt, dass die Fokussierstrecken zur Kollimation und Umlenkung des Protonenstrahls auf cm-Wegstrecken erfolgt.

[0015] Der Einsatz von gepulsten Pulsfeldspulen mit magnetischen Flussdichten in Höhe der vier- bis fünffachen Größe der magnetischen Flussdichte supraleitender Spulen führt zu einer vier- bis fünffachen stärkeren Bahnkrümmung und einer damit zu einer effizienteren Energieselektion.

[0016] Trotz der Höhe der magnetischen Flussdichten ist der Betrieb der gepulsten Magnetfeldspulen energetisch von Vorteil, weil die kurzen Pulszeiten moderatere Anschlussleistungen und Pulsenergien im Bereich von 10 bis 100 kJ erfordern. Pulswiederholraten von 1 s^{-1} können beispielsweise mit konventionellen Drehstromanschlüssen (25 bis 250 A, 10 bis 100 kW) bewältigt werden.

[0017] [Abb. 1](#) zeigt eine prinzipielle erfindungsgemäße Anordnung zur Erzeugung von hochenergetischen Protonenstrahlen, bestehend aus einer Spule **1** zur Kollimation der Protonen, Spulen (in [Abb. 1](#) als Helmholtz-Spulenpaare dargestellt) zur Energieselektion **2** und Protonenstrahlführung **3**. Im oberen Bereich der [Abb. 1](#) ist das Ersatzbild des Pulsstromkreises **4** dargestellt, der aus Ladegerät V, Laderelais R, Pulsentladungskondensator C, triggerbarem Hochstromschalter T zusammensetzt ist, wobei die Spulen **1**, **2** und **3** separat oder gemeinsam, wie im Bild dargestellt, gepulst werden. Diese Spulen lassen sich mit Pulsstromgeneratoren betreiben, wobei unter anderem mehrere Ladegeräte parallel geschaltet werden können, um sehr kurze Ladezeiten zu erreichen.

[0018] Vor der Spule zur Kollimation befinden sich noch die Protonenquelle und Linsen zur Fokussierung.

[0019] Die Energieselektion des Teilprotonenstrahls höchster Energie E_x (mit $E_1 > E_2 > E_3 > \dots$) erfolgt mit einem gepulsten Helmholtz-Spulenpaar.

[0020] Der Protonenstrahl höchster Energie wird ausgewählt und anschließend wird der Strahl mittels bekannter Konzepte auf das zu bestrahlende Gebiet geführt werden. Sinnvollerweise wird auch die Spule zur Protonenstrahlführung **3** gepulst ausgeführt. Dabei kann die auf das zu bestrahlende Gebiet auftreffende Strahlungsintensität durch die Wahl des Pulszeitpunktes des Protonenstrahls während des Pulses des Magnetfeldes bestimmt werden.

[0021] Sinnvoll ist die Abspaltung nicht nur eines festen Energieniveaus des Protonenstrahls höchster Energie, sondern eines Teilprotonenstrahlbereichs höchster Energie mit E_1 bis E_x mit $x \Rightarrow 1$, bevorzugt $x = 2$ oder 3 . Die gesamte Energie des verbleibenden Protonenstrahlbereichs wird sehr klein gegenüber der Energie des ursprünglichen Protonenstrahls.

[0022] Erste Untersuchungen zeigen, dass ein Aufbau zur Protonenstrahlführung mit einer kompakten Anordnung als Gantry (Ausdehnung in jede Richtung etwa 3 m), welche Magnetspulen, Sektormagnete, Quadrupols und/oder Blenden umfasst, möglich ist, bei der durch eine optimale Auslegung Energien von 160 bis 250 MeV erreicht werden können. Der Vorteil durch die Ausnutzung dieser erfindungsgemäßen Anordnungen sind die enormen Platzeinsparungen gegenüber bisher bekannten Anordnungen.

Pulsstromgenerator

[0023] Eine mögliche vorteilhafte Anordnung zum Betreiben der Magnetspulen ist die Verwendung von einem 30 bis 100 kJ/10 bis 20 kV/50 kA/0,2 bis 0,4 GW-Pulsstromgenerator unter Verwendung eines oder mehrerer parallel geschalteter spannungsgeregelter Kondensator-Mittelspannungsladegeräte und einem lasergetriggerten Hochstrom-Thyristor betreiben, wobei die verwendeten durchschwingfähigen Mittelspannungs-Pulsentladungskondensatoren (10 bis 20 kV, je 50 μ F) und einem lasergetriggerten Hochstrom-Thyristor betreiben (60 kA). Die dabei erreichte Ladeleistung beträgt bei 400 V und 32 A etwa 16 kW. Als triggerbare Hochstromschalter können Thyristorschalter, Ignitrons, Thyratrons, IGBTs und andere Varianten verwendet werden.

[0024] Die hier gezeigten Spulen lassen sich sowohl einzeln, als auch in Serienschaltung pulsen. Eine Energiemenge von etwa 30 kJ ist für den Betrieb der gezeigten Magnetspulen bereits hinreichend, größere Energien können ebenfalls verwendet werden.

[0025] Ein 32 kJ/16 kV/250 kA/2 GW-Hochleistungspulsstromgenerator mit spannungsgeregeltem Kondensator-Mittelspannungsladegerät (16 kW, 400 V, 32 A), mehreren durchschwingfähigen Mittelspannungs-Pulsentladungskondensatoren (16 kV, je 50 μ F) und Ignitron-Hochstromschalter kann ebenfalls verwendet werden.

Spulen

[0026] Spulen mit Eisenkernen können für diese Anordnung nicht verwendet werden, weil sehr starke magnetische Felder aufgebaut werden und die Eisenkerne den Sättigungsbereich erreichen. Bekannte supraleitende Induktivitäten können ebenfalls nicht verwendet werden bzw. sind nicht gut geeignet, weil diese für einen Dauerbetrieb ausgelegt sind und im Pulsbetrieb bei Pulszeiten im Mikro- und Millisekundenbereich nicht verwendet werden können.

[0027] Erste Untersuchungen zeigen, dass klassische Helmholtz-Spulenpaare ($2r_a \sim H$) oder Zylinderspulen ($2r_a \sim H$ oder $2r_a \sim 3 \cdot 2^{-2}H$) für diese Anordnung verwendet werden können.

[0028] Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung der Spulenform bei einer oder mehreren Spulen ist die gekrümmte Form (ähnlich einer Banane), wie in [Abb. 4](#) dargestellt, weil damit die Strahlführung in Richtung des zu bestrahlendes Gebietes effizienter gestaltet werden kann. Gleichzeitig ermöglicht diese Form die einfache Separierung von Protonenstrahlen mit gleichzeitiger Führung des Protonenstrahls als Kombination der in [Abb. 1](#) dargestellten Spulen **2** und **3**. Eine weitere vorteilhafte Ausführung der Spulen ist die Anordnung einzelner Spulen als Quadrupole oder Multipole, wie z. B. des in [Abb. 3](#) dargestellten Quadrupols, mit dem gezielt Einfluss auf einzelne Protonen verschiedener Energien genommen werden kann.

Verwendung

[0029] Die beschriebene Anordnung zur Erzeugung hochenergetischer, gepulster Protonenstrahlen kann bei der lasergetriebenen Protonenstrahltherapie angewendet werden.

[0030] Die Amplitude der magnetischen Induktivität B wird im Bereich von größer als 2 T, vorzugsweise bis 60 T, besonders bevorzugt im Bereich von 20 bis 30 T gewählt. Damit erreicht man Fokussierstrecken zur Kollimation und Umlenkung des Protonenstrahls im cm-Bereich. Spulen mit dieser Größe des magnetischen Feldes sind prinzipiell für Dauerbetrieb geeignet, weil bei der Pulserzeugung die entstehenden mechanischen Belastungen noch im elastischen Bereich der Materialkoeffizienten liegen.

[0031] Es lässt sich feststellen, dass die gepulste Erzeugung des Magnetfeldes mit Pulszeiten im Bereich von 0,1 bis 1,0 ms keine Nachteile zu dem Gebrauch statischer Magnete darstellt, da die lasergetriebene Protonenstrahltherapie ebenfalls gepulst stattfindet und dabei wesentlich kürzere Zeitskalen verwendet werden.

[0032] Die Strahlführung ebenfalls gepulst auszuführen hat gegenüber den konventionellen resistiven Dauerstrom- oder supraleitenden Magneten den Vorteil, dass auf die Kühlung mit Helium verzichtet werden kann. Es zeigt sich, dass Luft- oder Stickstoffkühlung bzw. Kühlung mit stickstoffhaltigen Gasen ausreichend ist.

[0033] Die Auswahl der Energie E des Protonenpulses erfolgt über die Höhe der magnetischen Flussdichte B des magnetischen Feldes (**Abb. 2**). Eine Variante verwendet magnetische Pulse der Spulen mit einer Flussdichte die größer als die benötigte Flussdichte ist (durchgezogene Linie). In diesem Fall trifft der Protonenpuls (P_1 oder P_2) am Anstieg des Magnetpulses zu einem bestimmten Zeitpunkt t auf das die Spule. Der Zeitpunkt t korreliert mit der benötigten Flussdichte B und der damit verbundenen Energie E .

[0034] Die andere Variante benutzt magnetische Pulse unterschiedlicher Höhe der magnetischen Induktivität und der Protonenpuls P trifft genau im Maximum des magnetischen Pulses auf die Spule.

Tabelle 1:

E [MeV]	1	2	5	10	20	50	100	200
$v_p[c] = (2eU/m_p)^{1/2}$	0,046	0,065	0,103	0,146	0,206	0,326	0,461	0,653
$B[T] = m_p v_p / e r_{beam} (r_{beam} = 20 \text{ cm})$	0,72	1,02	1,62	2,29	3,23	5,11	7,22	10,23

[0035] **Abb. 5** zeigt eine mögliche Anordnung zur Erzeugung hochenergetischer Protonenstrahlen und deren Verwendung in der Protonenstrahltherapie. Die in

[0036] **Abb. 5** dargestellte Anordnung umfasst Magnetspulen, Sektormagnete, Quadrupol und Blenden. Die damit erreichte Ausdehnung der erfindungsgemäßen Anordnung reduziert sich um den Faktor 3 in der Länge oder Breite gegenüber dem bisherigen Stand der Technik, weil Abmessungen von etwa 3 Metern möglich sind.

[0037] Für die als erstes Beispiel in **Abb. 5** gezeigte Anordnung mit Auslegung der Spulenelemente im Bereich von -200 T/m bis 400 T/m erreicht man am Ende der Anordnung Protonenenergien im Behandlungsbereich von 160 bis etwa 250 MeV.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 7268835 B2 [\[0002\]](#)
- US 7317192 A [\[0002\]](#)

Patentansprüche

1. Anordnung zur Erzeugung hochenergetischer Protonenstrahlen bestehend aus Protonenquelle, Linsen oder Objekte zur Fokussierung des Protonenstrahls zur Kollimation, zur Energieselektion und zur Strahlführung, **dadurch gekennzeichnet**, dass gepulste Hochmagnetspulen zur Energieselektion und Strahlführung und optional zur Kollimation verwendet werden.
2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die gepulste Spule zur Kollimation eine Zylinderspule ist.
3. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine gepulste Spule zur Energieselektion ein Helmholtz-Spulenpaar ist, bevorzugt ausgeführt als zwei Zylinderspulen.
4. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine gepulste Spule zur Energieselektion als Sektormagnet in Kurvenform ausgeführt ist, um eine optionale gleichzeitige Strahlführung zu gewährleisten, wobei die Kurvenform bevorzugt in Bananenform ausgeführt ist.
5. Anordnung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die in Kurvenform ausgeführte Spule zur Energieselektion paarweise ausgeführt ist, ähnlich einem Helmholtz-Spulenpaar.
6. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine gepulste Spule zur Energieselektion als Quadrupole oder Multipole ausgeführt ist.
7. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die gepulsten Spulen zur Strahlführung als Helmholtz-Spulenpaare oder/und in Kurvenform bzw. als Sektormagnet ausgeführt sind, als Kurvenform bevorzugt in Form einer Banane, oder/und als Quadrupol oder/und Multipol ausgebildet sind.
8. Verwendung der Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die verwendeten gepulsten Spulen einzeln oder separat gepulst werden.
9. Verwendung nach Anspruch 8 in der lasergetriebenen Protonenstrahltherapie.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

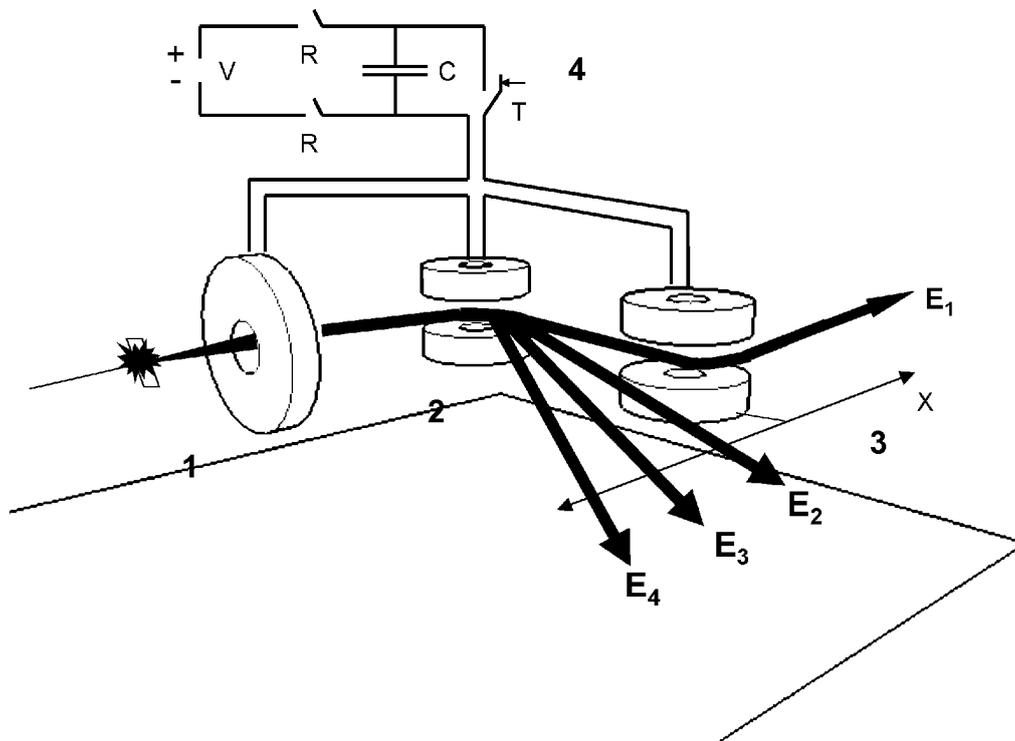


Abb. 1

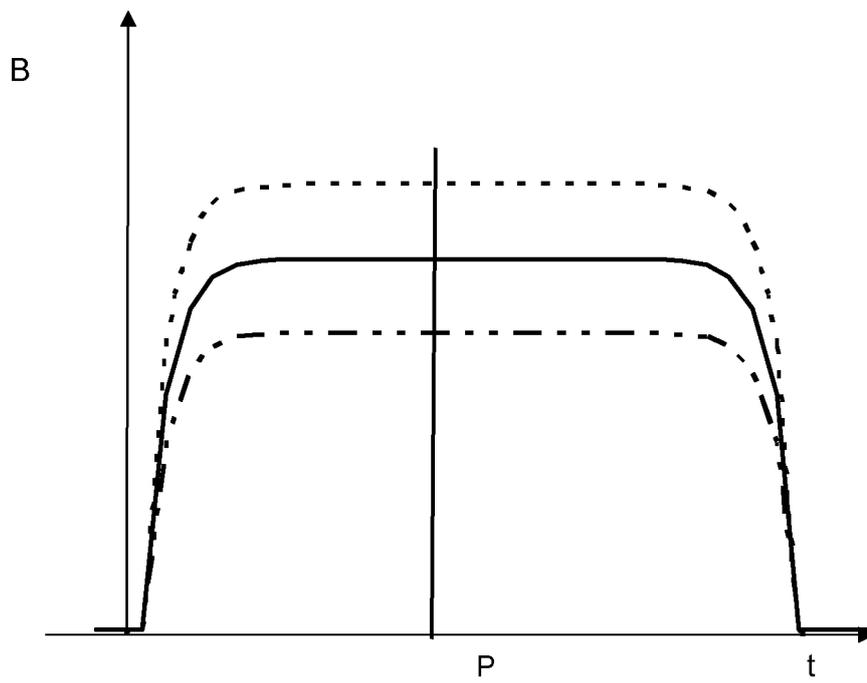
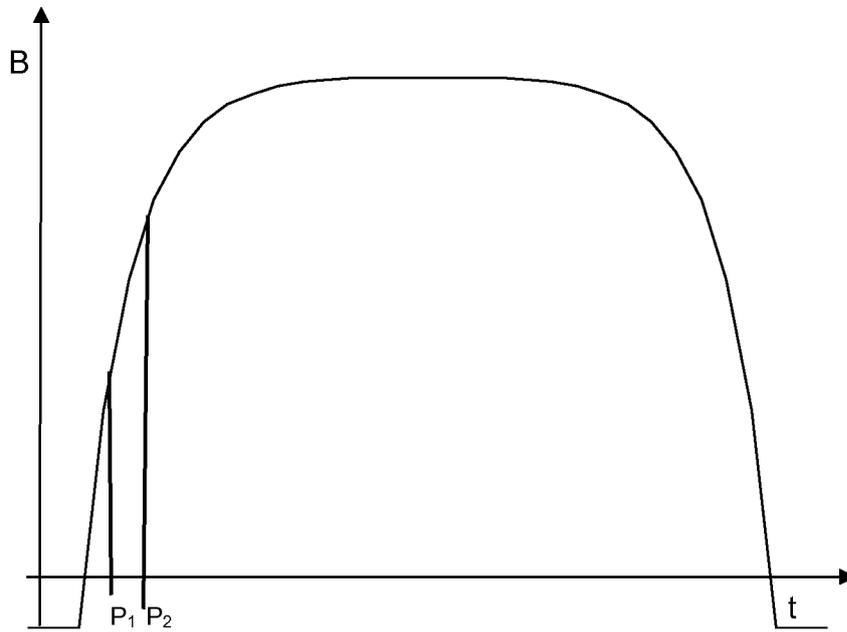


Abb. 2

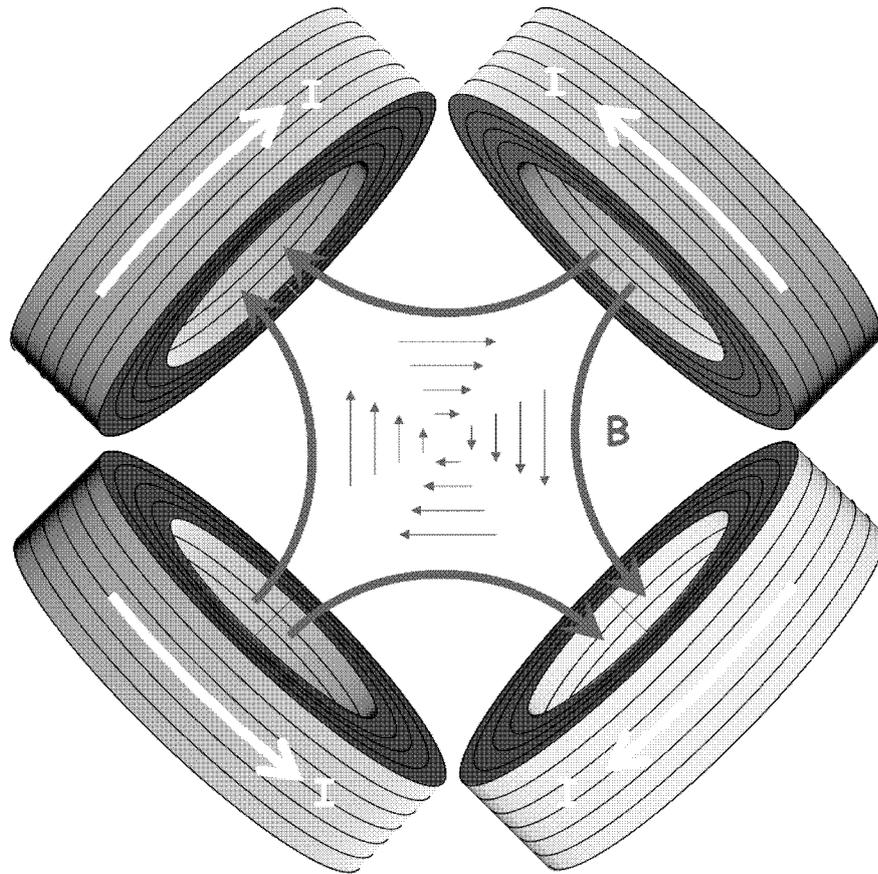


Abb. 3

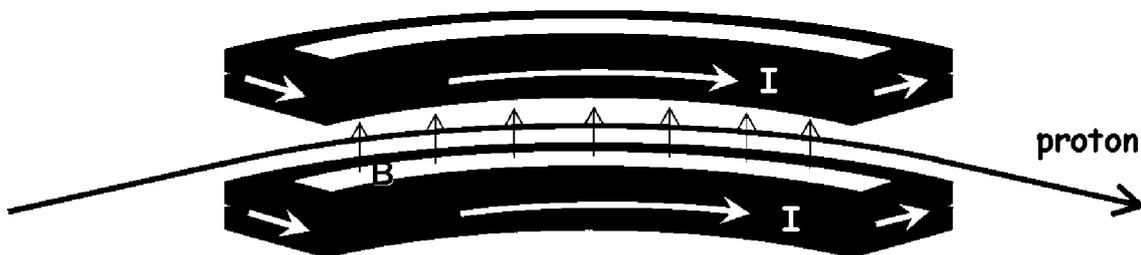


Abb. 4

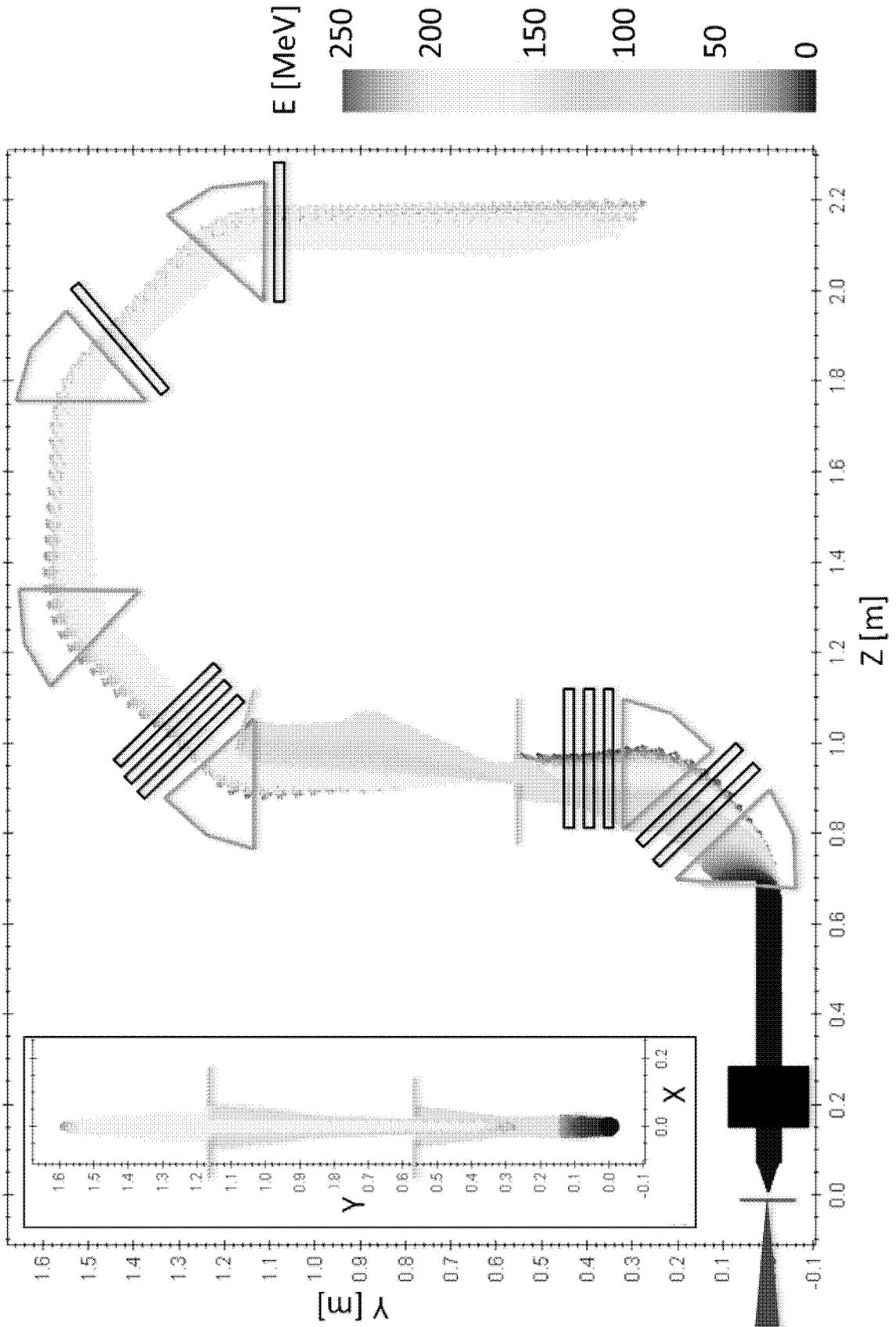


Abb. 5