



(11)

EP 2 340 692 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
17.12.2014 Patentblatt 2014/51

(51) Int Cl.:
H05H 7/04 (2006.01) H05H 13/04 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **09748993.4**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2009/007467

(22) Anmeldetag: **17.10.2009**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2010/046068 (29.04.2010 Gazette 2010/17)

(54) **UNDULATOR ZUR ERZEUGUNG VON SYNCHROTRONSTRAHLUNG**

UNDULATOR FOR PRODUCING SYNCHROTRON RADIATION

ONDULEUR DESTINÉ À PRODUIRE UN RAYONNEMENT SYNCHROTRON

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL
PT RO SE SI SK SM TR**

(30) Priorität: **24.10.2008 DE 102008053162**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
06.07.2011 Patentblatt 2011/27

(73) Patentinhaber: **Karlsruher Institut Für
Technologie
76021 Karlsruhe (DE)**

(72) Erfinder: **BERNHARD, Axel
76137 Karlsruhe (DE)**

(74) Vertreter: **Gärtner, Stephan et al
Karlsruher Institut für Technologie
Innovationsmanagement
Postfach 36 40
76021 Karlsruhe (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:
**DE-B3- 10 358 225 FR-A- 2 615 033
US-A- 4 977 384**

- **CHOUHAN S ET AL: "Optimization of the emitted spectrum of a superconductive undulator by correction coils and preparation for a storage ring test in ANKA" AIP CONFERENCE PROCEEDINGS AIP USA, Nr. 708, 2004, Seiten 179-182, XP002562051 ISSN: 0094-243X**
- **CHOUHAN S ET AL: "Field error compensation and thermal beam load in a superconductive undulator" PROCEEDINGS OF THE 2003 PARTICLE ACCELERATOR CONFERENCE (IEEE CAT. NO.03CH37423) IEEE PISCATAWAY, NJ, USA, Bd. 2, 2003, Seiten 899-901 Vol.2, XP002562052 ISBN: 0-7803-7738-9 in der Anmeldung erwähnt**

EP 2 340 692 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft Undulatoren, die als Quelle für elektromagnetische Strahlung dienen, die aus einem Teilchenstrom (z. B. Elektronen), der den Undulator durchläuft, erzeugt wird. Undulatoren werden insbesondere für die Erzeugung von Röntgenstrahlen in Synchrotronstrahlungsquellen eingesetzt.

[0002] Herkömmliche supraleitende Undulatoren bestehen aus zwei Teil-Undulatoren, die aus einem weichmagnetischen Wickelkörper und darauf gewickelten supraleitenden Spulenpaketen aufgebaut sind (siehe Robert Rossmanith und H. O. Moser, Design study of a superconductive invacuo undulator for storage rings with an electrical tunability between $k = 0$ and 2, Proceedings of the European Particle Accelerator Conference EPAC, S. 2340-2342, 2000). Hierbei sind die Spulenpakete in parallele Nuten im Wickelkörper gewickelt, während die zwischen den Nuten liegenden Stege als magnetische Pole des Undulators dienen. Für den Wickelkörper wird ein weichmagnetisches Material eingesetzt, um das Magnetfeld auf der Strahlachse durch die Magnetisierung der Pole zu verstärken.

[0003] Nach H. Onuki and P. Elleaume, Hrsg., Undulators, Wigglers and their Applications, Taylor & Francis, S. 183-190, 2003, ist für die Funktion des Undulators eine hohe Feldqualität von entscheidender Bedeutung. Diese lässt sich insbesondere als möglichst gut erfüllte Periodizität des Feldes beschreiben.

[0004] Durch die begrenzte erreichbare mechanische Genauigkeit ergeben sich in der Praxis lokale Abweichungen in Feldamplitude und -periode. Diese lassen sich wie in S. Chouhan, R. Rossmanith, S. Strohmer, D. Dölling, A. Geisler, A. Hobl, und S. Kubsy, Field error compensation and thermal beam load in a superconductive undulator, Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, S. 899-901, 2003, und S. Prestemon, D. R. Dietderich, S. A. Gourlay, P. Heimann, S. Marks, G. L. Sabbi, R. M. Scanlan, und R. Schlueter, Design and evaluation of a short period N3Sn superconducting undulator prototype, Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, S. 1032-1034, 2003, durch lokale Korrekturspulen kompensieren, was üblicherweise auch als *Shimming* bezeichnet wird.

[0005] Die DE 38 13 460 A1 offenbart einen Undulator zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung aus einem in diesen eingebrachten Teilchenstrom, der zwei Teil-Undulatoren aufweist, zwischen denen der Teilchenstrom eingebracht ist, wobei ein Körper Ausnehmungen aufweist, in die eine Vielzahl von magnetischen Polen des Undulators eingebracht sind, wobei der Körper abwechselnd aus einer parallel zueinander angebrachten Vielzahl von ersten Lagen und von zweiten Lagen aufgebaut ist, wobei die ersten Lagen jeweils ein nicht-magnetisches Material und die zweiten Lagen jeweils ein weichmagnetisches Material, die als Pole des Undulators dienen, aufweisen.

[0006] Nachteil dieser Anordnungen ist, dass die Kor-

rekturspulen im Undulatorspalt zwischen den beiden Teil-Undulatoren angeordnet werden müssen und damit entweder eine Vergrößerung des Undulatorspaltes und daher eine Verringerung der erreichbaren Feldamplitude nach sich ziehen oder den für den Elektronenstrahl zur Verfügung stehenden Platz und daher beim Betrieb in einem Speicherring die Lebensdauer des Elektronenstrahls verringern.

[0007] Um diese Nachteile zu vermeiden, sollten die lokalen Korrekturspulen lateral, d.h. senkrecht zur Hauptrichtung (Längsachse) des Wickelkörpers angeordnet werden. Allerdings magnetisiert das Feld derartig angeordneter Korrekturspulen den in weiten Teilen ungesättigten Wickelkörper auf und verteilt sich auf diese Weise über die ganze Länge des Undulators. Daher eignen sich lokale Korrekturspulen trotz ihrer Bezeichnung nicht für eine effektive lokale Feldfehlerkorrektur.

[0008] Ausgehend davon ist es die Aufgabe der Erfindung, einen Undulator anzugeben, der die vorher genannten Nachteile und Einschränkungen nicht aufweist. Insbesondere soll ein Undulator bereitgestellt werden, der eine effektive lokale Feldfehlerkorrektur (*Shimming*) durch lateral angebrachte Korrekturspulen ermöglicht.

[0009] Gelöst wird diese Aufgabe durch die Merkmale des Patentanspruchs 1. Die Unteransprüche beschreiben vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung.

[0010] Die der Erfindung zu Grunde liegende Idee besteht darin, den magnetischen Fluss in longitudinaler Richtung, d.h. entlang der Hauptrichtung des Wickelkörpers, zu unterbrechen. Auf diese Weise wird es möglich, ein sehr gut lokalisiertes Korrekturfeld durch laterale Korrekturspulen, die an den betreffenden Polen des Undulators angebracht sind, zu erzeugen.

[0011] Diese Idee wird durch den erfindungsgemäßen Aufbau des Wickelkörpers in Form einer *Laminierung* realisiert. Hierzu wird der Wickelkörper abwechselnd aus magnetischen und nicht-magnetischen Lagen (Schichten, Scheiben), die jeweils nicht parallel zur Strahlachse stehen, aufgebaut.

[0012] In einer besonderen Ausgestaltung wird die Laminierung durch einen Aufbau des Wickelkörpers aus abwechselnd angeordneten weichmagnetischen Polblechen und nicht-magnetischen Blechen, die als Wickelgrund für die Spulenpakete dienen und die den magnetischen Fluss in longitudinaler Richtung unterbrechen, realisiert. Die Korrekturspulen sind an den hierfür benötigten Stellen jeweils lateral in Bezug auf die Längsachse des Wickelkörpers angebracht.

[0013] Eine erfindungsgemäße Vorrichtung besteht somit aus zwei Teil-Undulatoren, zwischen denen der Teilchenstrom, der z. B. aus Elektronen besteht, eingebracht ist. Hierbei weist jeder Teil-Undulator einen Wickelkörper auf, der so ausgestaltet ist, dass er sich zur Aufnahme eines Spulenpakets und einer Vielzahl, vorzugsweise von 20 bis 500, besonders bevorzugt von 50 bis 200, von magnetischen Polen des Undulators eignet. Hierbei besteht der Wickelkörper abwechselnd aus einer Vielzahl, vorzugsweise von 20 bis 500, besonders be-

vorzugt von 50 bis 200, von ersten Lagen und von zweiten Lagen, die derart angeordnet sind, dass sie parallel zueinander, jedoch nicht parallel zur Richtung des Teilchenstroms stehen.

[0014] In einer besonderen Ausgestaltung nehmen die ersten Lagen und die hierzu parallelen zweiten Lagen jedes Wickelkörpers einen Winkel von 15° bis 165°, bevorzugt von 60° bis 120°, besonders bevorzugt annähernd 90° in Bezug auf den Teilchenstrom ein. Im Falle, dass der genannte Winkel annähernd 90° beträgt, handelt es sich bei der vorliegenden Erfindung um eine Weiterentwicklung eines herkömmlichen supraleitenden Undulators, ansonsten um eine Weiterentwicklung eines helischen supraleitenden Undulators gemäß der DE 103 58 225 B3.

[0015] Die ersten Lagen bestehen jeweils zumindest teilweise aus einem nicht-magnetischen Material, das geometrisch so ausgestaltet und angeordnet ist, dass darüber das vorzugsweise supraleitende Spulenpaket geführt wird. Als Material werden bevorzugt nicht-magnetische Bleche, insbesondere aus Kupfer oder aus einem glasfaserverstärkten Kunststoff eingesetzt.

[0016] Die zweiten Lagen bestehen jeweils zumindest teilweise aus einem weichmagnetischen Material, die als Pole des Undulators dienen. Als Material werden vorzugsweise weichmagnetische Polbleche, insbesondere aus Eisen oder einer Eisenkobaltlegierung eingesetzt.

[0017] Bevorzugt sind die ersten Lagen und die zweiten Lagen jeweils gleich dick, wobei das Verhältnis der Dicke der ersten Lagen zur Dicke der zweiten Lagen von 1:1 bis 3:1 beträgt.

[0018] Erfindungsgemäß wird an den Undulator mindestens eine Korrekturspule lateral in Bezug auf die Achse des Wickelkörpers an eine der zweiten Lagen angebracht oder in eine Aussparung im Wickelkörper in eine der zweiten Lagen eingebracht. Insbesondere ist es vorteilhaft, gleichzeitig jeweils 2 Korrekturspulen an einander gegenüberliegenden zweiten Lagen der beiden Teil-Undulatoren anzubringen. Wie unten gezeigt wird, ermöglicht der besondere Aufbau des erfindungsgemäßen Undulators die Erzeugung eines wohl lokalisierten Korrekturfeldes durch laterale Korrekturspulen.

[0019] Die Erfindung weist insbesondere die im Folgenden erwähnten Vorteile auf. Der erfindungsgemäße Undulator ermöglicht eine effektive lokale Feldfehlerkorrektur (*Shimming*) durch das Anbringen von lateralen Korrekturspulen an ausgewählten zweiten Lagen. Bei Einsatz eines gut wärmeleitenden nicht-magnetischen Materials kann der Wärmetransport durch den Wickelkörper und damit insgesamt die Kühlung der Spulen verbessert werden.

[0020] Die Erfindung wird im Folgenden anhand eines Ausführungsbeispiels und den Figuren näher erläutert. Hierbei zeigen:

Fig. 1 Schematische Darstellung des Aufbaus eines erfindungsgemäßen supraleitenden Undulators;

Fig. 2 Schematische Darstellung des Aufbaus eines erfindungsgemäßen supraleitenden Undulators, um 30° gegenüber **Fig. 1** gedreht, mit eingebrachter Korrekturspule;

Fig. 3 Verlauf des Magnetfelds auf der Strahlachse, erzeugt von einem Undulator mit lateralen Korrekturspulen gemäß dem Stand der Technik (**a**) bzw. bei Einsatz eines erfindungsgemäßen supraleitenden Undulators (**b**).

[0021] In **Fig. 1** ist der Aufbau eines erfindungsgemäßen supraleitenden Undulators **10** schematisch dargestellt. Der Undulator **10** besteht aus zwei Teil-Undulatoren **11**, **12**, zwischen denen der Teilchenstrom **1** aus Elektronen verläuft. Jeder Teil-Undulator **11**, **12** besitzt einen Wickelkörper, der abwechselnd aus einer parallel zueinander angebrachten Vielzahl von ersten Lagen **21**, **21'**, **21''**, ... und von zweiten Lagen **22**, **22'**, **22''**, ... besteht.

[0022] Die ersten und zweiten Lagen sind in diesem Beispiel so angeordnet, dass sie jeweils senkrecht zur Richtung des Teilchenstroms **1** stehen. Die ersten Lagen **21**, **21'**, **21''**, ... bestehen jeweils aus Kupferblechen als nicht-magnetischem Material, über das das supraleitende Spulenpaket geführt wird. Die zweiten Lagen **22**, **22'**, **22''**, ... bestehen jeweils aus Eisenblechen als weichmagnetischem Material und dienen hierbei als Pole des Undulators.

[0023] In **Fig. 2** ist der Aufbau eines erfindungsgemäßen supraleitenden Undulators **10**, der um ca. 30° gegenüber dem Undulator aus **Fig. 1** gedreht ist und der zusätzlich die Korrekturspulen **31**, **31'** aufweist, schematisch dargestellt. Die Korrekturspulen **31**, **31'** sind hierbei in jedem Teil-Undulator **11**, **12** jeweils lateral in Bezug auf die Achse des Wickelkörpers um eine der zweiten Lagen gewickelt. Alternativ eignet sich auch ein Anbringen der Korrekturspulen **31**, **31'** an eine der zweiten Lagen durch Kleben, Anschrauben oder ein anderes Befestigungsverfahren.

[0024] Finite-Elemente-Rechnungen zeigen, wie in **Fig. 3** dargestellt, dass der besondere Aufbau des erfindungsgemäßen Undulators die Erzeugung eines wohl lokalisierten Korrekturfeldes durch laterale Korrekturspulen **31**, **31'** ermöglicht. In **Fig. 3a** ist der berechnete Verlauf des Magnetfelds auf der Strahlachse bei Einsatz von lateralen Korrekturspulen in einem Undulator gemäß dem Stand der Technik dargestellt. Hierbei wurde der durchgehende unmagnetisierte Wickelkörper durch die Korrekturspulen vollständig aufmagnetisiert. Hieraus ist ersichtlich, dass der Einsatz von lateral angebrachten Korrekturspulen keine lokale Korrektur des lokalen Magnetfelds in einem herkömmlichen Undulator erlaubt.

[0025] Demgegenüber zeigt **Fig. 3b** den berechneten Verlauf des Magnetfelds auf der Strahlachse bei Einsatz eines erfindungsgemäßen laminierten Undulators. Hieraus ergibt sich, dass nunmehr der Einsatz von lateral angebrachten Korrekturspulen eine wohl definierte lokale Korrektur des lokalen Magnetfelds in einem erfin-

dungsgemäßen Undulator erlaubt.

Patentansprüche

1. Undulator (10) zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung aus einem in diesen eingebrachten Teilchenstrom (1), umfassend zwei Teil-Undulatoren (11, 12), zwischen denen der Teilchenstrom (1) eingebracht ist, wobei jeder Teil-Undulator (11, 12) einen Wickelkörper zur Aufnahme eines Spulenpakets und einer Vielzahl von magnetischen Polen des Undulators enthält, wobei eine Korrekturspule (31) lateral in Bezug auf die Längsachse des Wickelkörpers an eine der zweiten Lagen angebracht oder in eine Aussparung im Wickelkörper in eine der zweiten Lagen eingebracht ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Wickelkörper abwechselnd aus einer parallel zueinander angebrachten Vielzahl von ersten Lagen (21, 21', 21'', ...) und von zweiten Lagen (22, 22', 22'', ...) die jeweils nicht parallel zur Richtung des Teilchenstroms (1) angeordnet sind, aufgebaut ist, wobei die ersten Lagen (21, 21', 21'', ...) jeweils ein nicht-magnetisches Material, das den magnetischen Fluss in longitudinaler Richtung unterbricht, über das das Spulenpaket geführt wird, enthalten und die zweiten Lagen (22, 22', 22'', ...) jeweils ein weichmagnetisches Material, die als Pole des Undulators dienen, aufweisen, so dass ein lokalisiertes Korrekturfeld durch laterale Korrekturspulen erzeugt wird.
2. Undulator nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Verhältnis der Dicke der ersten Lagen zur Dicke der zweiten Lagen von 1:1 bis 3:1 beträgt.
3. Undulator nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** Kupfer oder ein glasfaserverstärkter Kunststoff als nicht-magnetisches Material dient.
4. Undulator nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** Eisen oder eine Eisenkobaltlegierung als weichmagnetisches Material dient.
5. Undulator nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die ersten Lagen (21, 21', 21'', ...) und die zweiten Lagen (22, 22', 22'', ...) jedes Wickelkörpers einen Winkel von 15° bis 165° in Bezug auf den Teilchenstrom (1) annehmen.
6. Undulator nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Winkel ein Wert von 60° bis 120° ausgewählt wird.

Claims

1. An undulator (10) for producing synchrotron radiation from a particle stream (1) introduced into it, comprising two partial undulators (11, 12), between which the particle stream (1) is introduced, wherein each partial undulator (11, 12) comprises a winding body for receiving a coil package and a plurality of magnetic poles of the undulator, wherein a correction coil (31) is located laterally in relation to the longitudinal axis of the winding body at one of the two layers or introduced into an opening in the winding body into one of the layers, **characterised in that** the winding body is formed alternately from a plurality of first layers (21, 21', 21'', ...) and of second layers (22, 22', 22'', ...), located parallel to one another, and which in each case are arranged not parallel to the direction of the particle stream (1), wherein the first layers (21, 21', 21'', ...) in each case contain a non-magnetic material, which interrupts the magnetic flux in the longitudinal direction, over which the coil package is guided, and the second layers (22, 22', 22'', ...) in each case comprise a soft magnetic material, which serve as poles of the undulator, such that a localised correction field is produced by lateral correction coils.
2. An unduator according to claim 1, **characterised in that** the ratio of the thickness of the first layers to the thickness of the second layers ranges from 1:1 to 3:1.
3. An unduator according to claim 1 or 2, **characterised in that** copper or a glass fibre-reinforced plastic serves as a non-magnetic material.
4. an unduator according to any one of claims 1 to 3, **characterised in that** iron or an iron cobalt alloy serves as the soft magnetic material.
5. An unduator according to any one of claims 1 to 4, **characterised in that** the first layers (21, 21', 21'', ...) and the second layers (22, 22', 22'', ...) of each winding body adopt an angle of 15° to 165° in relation to the particle stream (1).
6. An unduator according to claim 5, **characterised in that**, as an angle, a value from 60° to 120° is selected.

Revendications

1. ° Onduleur (10) permettant de générer un rayonnement synchrotron à partir d'un courant de particules (1) fourni dans celui-ci, comprenant deux ondulateurs partiels (11, 12) entre lesquels le courant de particules (1) est introduit, chacune de ces parties d'ondulateurs (11, 12) comprenant un corps d'enroulement

pour la réception d'un paquet de bobines et de plusieurs pôles magnétiques de l'onduleur, une bobine de correction (31) étant montée latéralement par rapport à l'axe longitudinal du corps d'enroulement, sur l'une des deux couches, ou étant introduite dans un évidement du corps d'enroulement dans l'une des secondes couches,

caractérisé en ce que

le corps d'enroulement est alternativement constitué d'une série de premières couches (21, 21', 21'', ...) et de secondes couches (22, 22', 22'', ...) positionnées parallèlement les unes aux autres qui ne sont respectivement pas parallèles à la direction du courant de particules (1), les premières couches (21, 21', 21'', ...) renfermant respectivement un matériau non magnétique qui interrompt en direction longitudinale, le flux magnétique par lequel le paquet de bobines est parcouru, et les secondes couches (22, 22', 22'', ...) renfermant respectivement un matériau magnétique doux servant de pôle de l'onduleur de sorte qu'un champ de correction localisé soit engendré par les bobines de correction latérales.

2. °) Onduleur conforme à la revendication 1,
caractérisé en ce que
le rapport de l'épaisseur des premières couches à l'épaisseur des secondes couches est de 1:1 à 3:1.
3. °) Onduleur conforme à la revendication 1 ou 2,
caractérisé en ce que
le matériau non magnétique est du cuivre ou un matériau synthétique renforcé par des fibres de verre.
4. °) Onduleur conforme à l'une des revendications 1 à 3,
caractérisé en ce que
le matériau magnétique doux est du fer ou un alliage de fer et de cobalt.
5. °) Onduleur conforme à l'une des revendications 1 à 4,
caractérisé en ce que
les premières couches (21, 21', 21'', ...) et les secondes couches (22, 22', 22'', ...) de chacun des corps d'enroulement font un angle de 15° à 165° par rapport au courant de particules (1).
6. °) Onduleur conforme à la revendication 5,
caractérisé en ce qu'
entant qu'angle on choisit une valeur de 60° à 120°.

Fig. 1

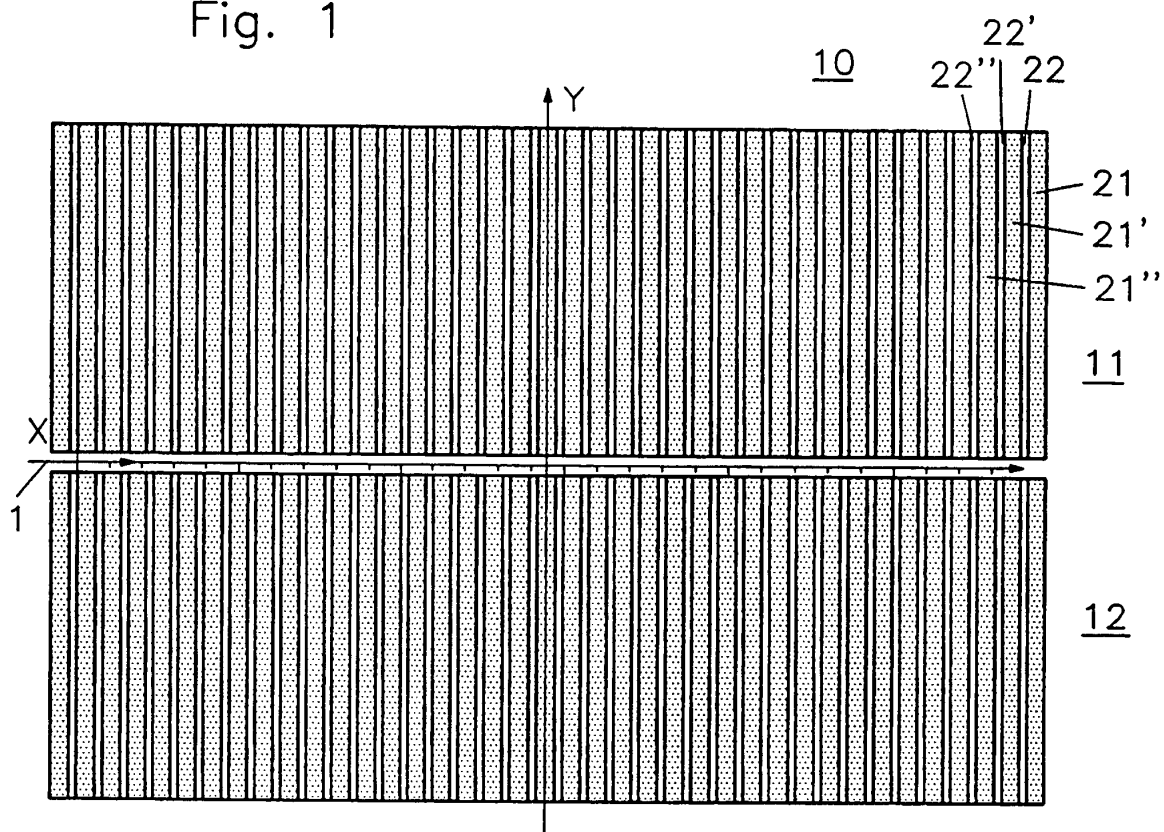


Fig. 2

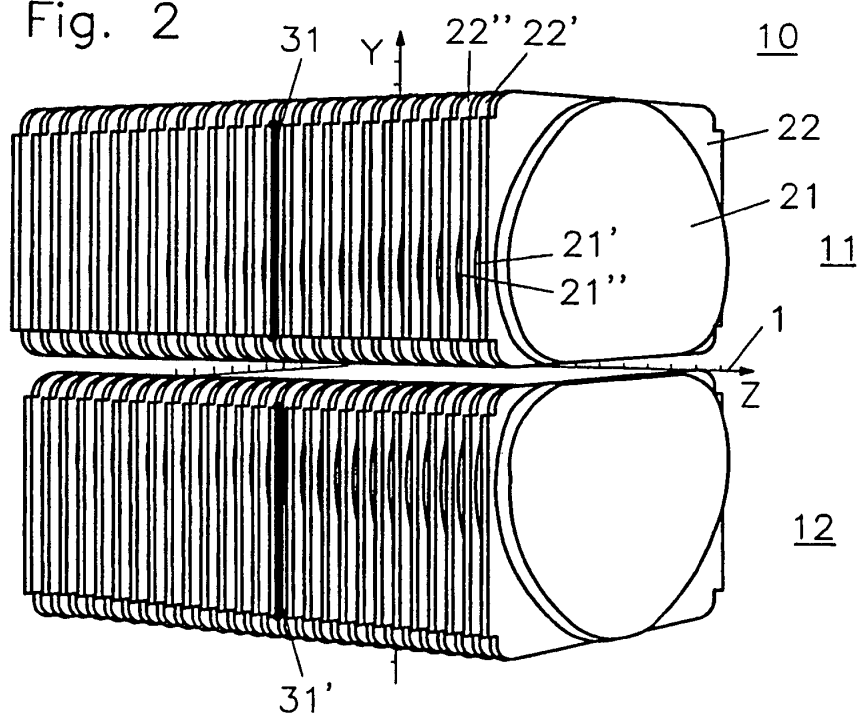


Fig. 3a

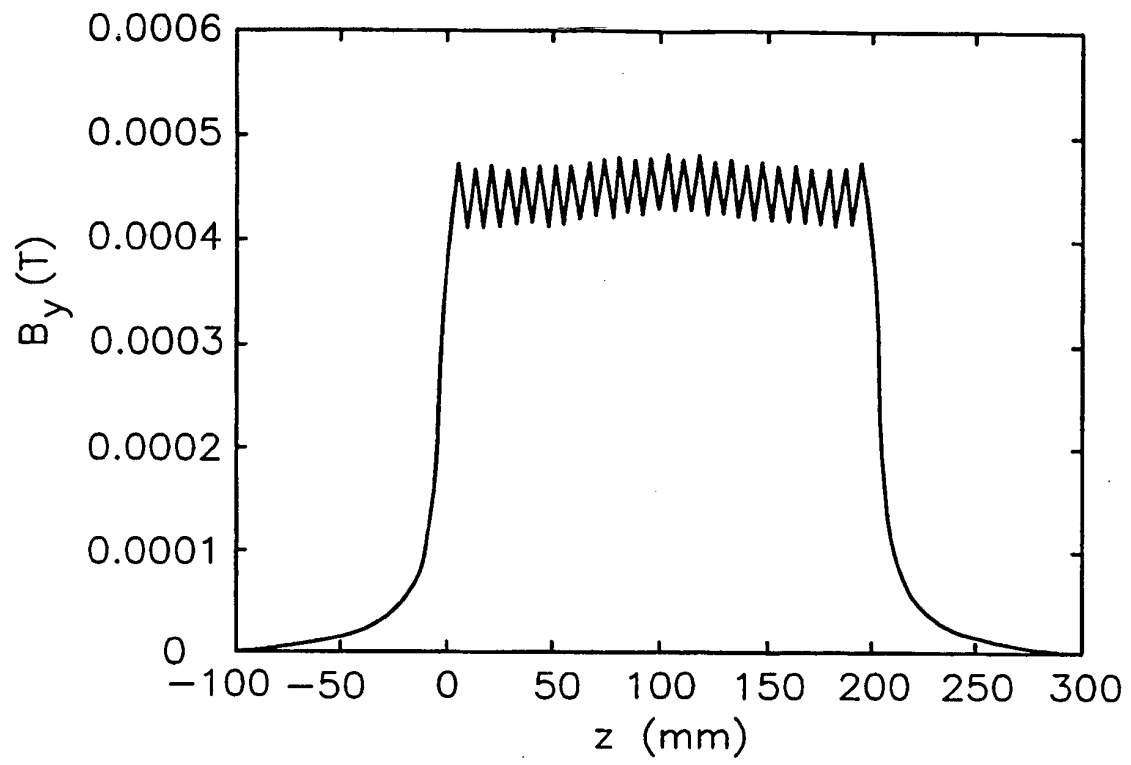
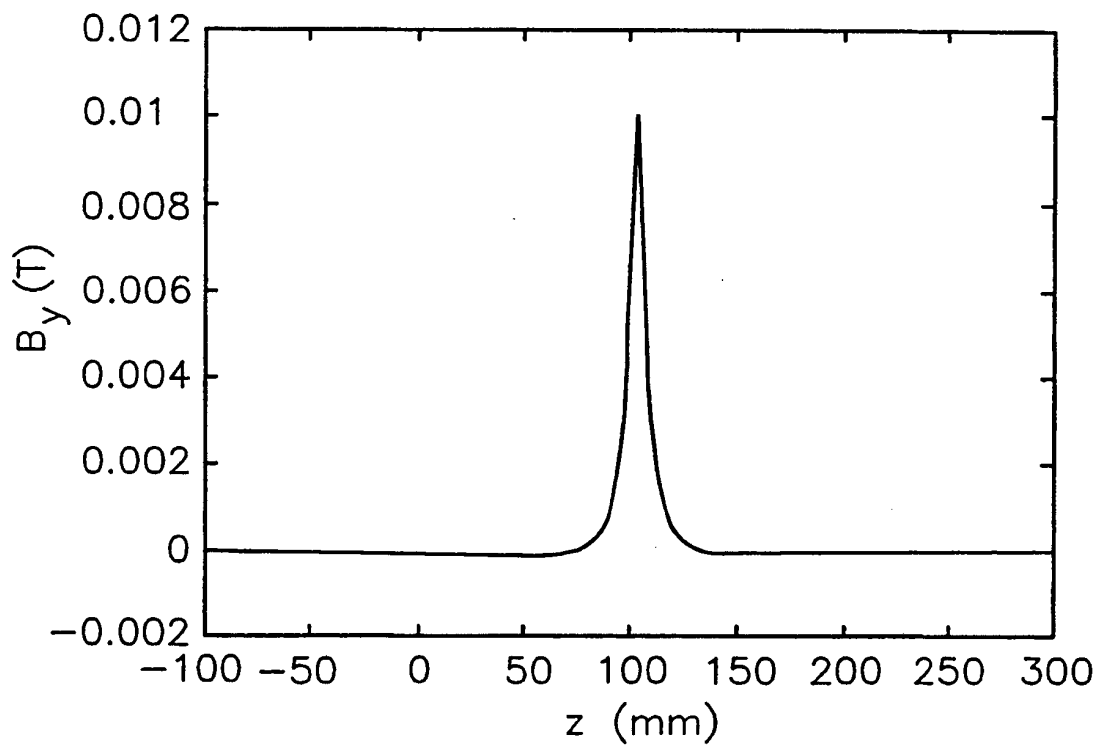


Fig. 3b



IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 3813460 A1 [0005]
- DE 10358225 B3 [0014]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **ROBERT ROSSMANITH ; H. O. MOSER.** Design study of a superconductive invacuo undulator for storage rings with an electrical tunability between $k = 0$ and 2. *Proceedings of the European Particle Accelerator Conference EPAC*, 2000, 2340-2342 [0002]
- Undulators, Wigglers and their Applications. Taylor & Francis, 2003, 183-190 [0003]
- **S. CHOUHAN ; R. ROSSMANITH ; S. STROHMER ; D. DÖLLING ; A. GEISLER ; A. HOBL ; S. KUBSKY.** Field error compensation and thermal beam load in a superconductive undulator. *Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference*, 2003, 899-901 [0004]
- **S. PRESTEMON ; D. R. DIETDERICH ; S. A. GOURLAY ; P. HEIMANN ; S. MARKS ; G. L. SABBI ; R. M. SCANLAN ; R. SCHLUETER.** Design and evaluation of a short period N3Sn superconducting undulator prototype. *Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference*, 2003, 1032-1034 [0004]