

(19)



(11)

**EP 2 654 044 A2**

(12)

**EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:  
**23.10.2013 Patentblatt 2013/43**

(51) Int Cl.:  
**G21K 1/06 (2006.01)**

(21) Anmeldenummer: **13075029.2**

(22) Anmeldetag: **17.04.2013**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AL 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 RS SE SI SK SM TR**  
 Benannte Erstreckungsstaaten:  
**BA ME**

(71) Anmelder: **Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH**  
**14109 Berlin (DE)**

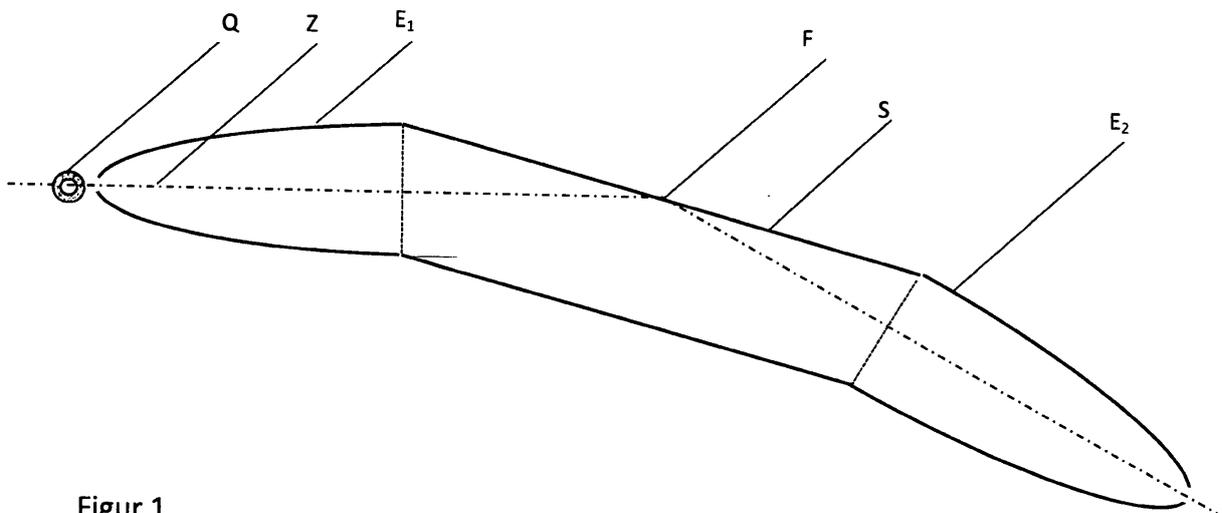
(30) Priorität: **17.04.2012 DE 102012008349**  
**16.11.2012 DE 102012022445**

(72) Erfinder:  
 • **Krist, Thomas**  
**10627 Berlin (DE)**  
 • **Cussen, Leo**  
**Doncaster 3108 (AU)**

(54) **Neutronenleitersystem**

(57) Die Erfindung betrifft ein Neutronenleitersystem für Neutronen mit einer Wellenlänge  $> 0,1 \text{ \AA}$ , aufweisend eine Quelle zur Erzeugung von Neutronen und mindestens zwei Neutronenleiter mit sich - nicht linear - verjüngendem und/oder erweiterndem Querschnitt und einem zwischen den beiden Neutronenleitern mit sich änderndem Querschnitt angeordneten Neutronenleiter mit geraden Wänden, bei dem mindestens eine Innenfläche des Neutronenleiters mit geraden Wänden als Spiegel ausgebildet ist, auf den der aus dem ersten Neutronenleiter mit sich - nicht linear - änderndem Querschnitt aus-

tretende Neutronenstrahl fällt, der Spiegel in einem kleinen Winkel von  $0,01^\circ$  bis  $5^\circ$  zur Neutronenstrahlachse angeordnet ist, dass der Großteil der auf den Spiegel einfallenden Strahlung reflektiert wird, und der zweite Neutronenleiter mit sich - nicht linear - änderndem Querschnitt im Strahlengang der vom Neutronenleiter mit geraden Wänden transmittierten Neutronen angeordnet ist. Der letztgenannte Neutronenleiter kann auch einen in zwei Teilabschnitten zum Fokus des ersten Neutronenleiters hin sich linear verjüngenden Querschnitt aufweisen.



Figur 1

**EP 2 654 044 A2**

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Neutronenleitersystem für Neutronen mit einer Wellenlänge  $> 0,1 \text{ \AA}$ , aufweisend eine Quelle zur Erzeugung von Neutronen und mindestens zwei Neutronenleiter mit sich - nicht linear - verjüngendem und/oder erweiterndem Querschnitt und einem zwischen den beiden Neutronenleitern angeordneten Neutronenleiter mit geraden Wänden, wobei die kleine Öffnung des ersten Neutronenleiters mit sich - nicht linear - änderndem Querschnitt und die große Öffnung des zweiten Neutronenleiters mit sich nicht linear - änderndem Querschnitt jeweils dem aus der Quelle austretenden Neutronenstrahl zugewandt sind.

**[0002]** Seit einigen Jahren werden Neutronenleiter zur Erhöhung der Transmission nicht mehr nur mit rechteckigem, konstantem sondern auch mit elliptisch oder parabolisch sich verjüngendem Querschnitt gebaut. Diese Neutronenoptiken bilden in Neutronenleitersystemen Abschnitte mit divergierenden oder konvergierenden Eigenschaften bezüglich des Neutronenstrahls und verringern die Anzahl der Reflexionen des Strahls im Vergleich zu geraden Neutronenleitern. Durch die speziellen Abbildungsgeometrien werden die Neutronenstrahlen stark gebündelt und auf sehr kleine Proben fokussiert.

**[0003]** Die Eigenschaften von derartigen Neutronenleitern verschiedener Geometrien werden von Schanzer et al. in Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 529 (2004) 63-68 diskutiert.

**[0004]** In dem Aufsatz "Correction of Optical Aberrations in Elliptic Neutron Guides" von Bentley et al., gefunden unter arXiv: 1201.4286v1 [physics.ins-det] 20 Jan 2012, ist ein ballistisches Neutronenleitersystem bestehend aus drei Abschnitten dargestellt. Der erste Abschnitt wird von einem konisch geformten Neutronenleiter gebildet, der eine divergierende Funktion hat, der zweite Abschnitt von einem geraden Neutronenleiter und der dritte Abschnitt mit konvergierender Wirkung wiederum von einem parabolisch geformten Neutronenleiter.

**[0005]** Die Hälfte einer Ellipse wird in einer SANS-Anordnung verwendet, die in einem Vortrag während des International Workshop on Neutron Optics, 17th-19th March, 2010 in Alpe d'Huez, France mit dem Titel "Properties of elliptic guides for neutron beam transport and potential application for new instrumentation" von Martin-Rodriguez et al. beschrieben wurde.

**[0006]** Bei den beschriebenen Anordnungen wirkt sich jedoch nachteilig aus, dass die direkte Sicht (aus der Neutronenquelle bis zum Auftreffort) nicht unterdrückt wird und somit bis zum Ende des Neutronenleiters schnelle Neutronen auftreten, die eine dicke und teure Abschirmung erfordern. Dieser Thematik widmet sich auch der Aufsatz "Shielding of elliptic guides with direct sight to the moderator" von Böni et al. in Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 624 (2010) 162-167.

**[0007]** In Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 634 (2011) S100-S103 wird von Kleinø u.a.

die Idee eines sehr langen Neutronenleitersystems beschrieben, bei dem die Gravitation so ausgenutzt wird, dass schnelle Neutronen nicht durch den Neutronenleiter gelangen.

**[0008]** Bei Neutronenleitern mit festem Querschnitt werden die Leiter gekrümmt, bei Neutronenleitern mit elliptischem Querschnitt ist in der Mitte des Neutronenleiters ein Strahlstopp eingebaut, der die direkte Sicht unterbricht, wie beispielsweise von Böni in Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 586 (2008) 1-8 beschrieben.

**[0009]** Nachteilig wirkt sich jedoch aus, dass ein nicht zu vernachlässigender Anteil von Neutronen, darunter die besonders erwünschten und "wertvollen" Neutronen mit kleiner Divergenz, dabei absorbiert werden. Außerdem ist eine Konstruktion, bei der ein schweres und langes System mit neutronenabsorbierenden Materialien im Inneren eines Leiters aus hochpolierten und beschichteten Gläsern angebracht werden muss, technisch sehr anspruchsvoll und aufwändig.

**[0010]** Deshalb ist es Aufgabe der Erfindung, eine kostengünstige Anordnung für ein Neutronenleitersystem der eingangs genannten Art anzugeben, bei dem die direkte Sicht von der Neutronenquelle unterdrückt ist, ohne dass unvorteilhafte Einbauten in den Leiter erforderlich sind und mehr nutzbare Neutronen transmittiert werden.

**[0011]** Die Aufgabe wird durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst. Dabei ist in einem Neutronenleitersystem der eingangs genannten Art erfindungsgemäß mindestens eine Innenfläche des Neutronenleiters mit geraden Wänden als Spiegel ausgebildet, auf den der aus dem ersten Neutronenleiter mit sich nicht linear - änderndem Querschnitt austretende Neutronenstrahl fällt, die mindestens eine als Spiegel ausgebildete Innenfläche des geraden Neutronenleiters ist in einem kleinen Winkel von  $0,01^\circ$  bis  $5^\circ$  zur Neutronenstrahlachse angeordnet und der zweite Neutronenleiter mit sich - nicht linear - änderndem Querschnitt ist im Strahlengang der vom Spiegel reflektierten Neutronen - d. h. aus der Strahlachse heraus gekippt - angeordnet. Dadurch hat der Ausgang des zweiten Neutronenleiters mit sich - nicht linear - änderndem Querschnitt keine direkte Sicht mehr auf die Neutronenquelle. Durch die Spiegelung bleiben die positiven optischen Eigenschaften des zweiten Neutronenleiters mit sich - nicht linear - änderndem Querschnitt erhalten. Das erfindungsgemäße Neutronenleitersystem mit gekipptem Spiegel weist im Vergleich zu einer Anordnung mit zwei elliptisch geformten Neutronenleitern eine höhere Transmission auf, denn die Reflexionen in den beiden inneren Ellipsenabschnitte fallen weg. Außerdem ist die Divergenz der Neutronen an der Stelle des Spiegels niedriger - d. h. es treten kleinere Winkel des Neutronenstrahls auf - als an der Eintrittsöffnung des ersten Neutronenleiters mit sich - nicht linear - änderndem Querschnitt, wodurch die Reflektivität des geraden, als Spiegel ausgebildeten Neutronenleiters höher ist. Wegen des geringen Winkels, den die als Spiegel ausgebildete Innenfläche des geraden Neutronenleiters mit

der Strahlachse bildet, wird ein Großteil der einfallenden Neutronen reflektiert.

**[0012]** Zur Anpassung der Neutronenleiter an einen gewünschten Strahlengang im Neutronenleitersystem sind spezielle Ausführungsformen der Erfindung vorgesehen.

**[0013]** So ist der mindestens eine Spiegel im Neutronenleiter mit geraden Wänden auf einer vertikalen oder horizontalen Innenfläche des geraden Neutronenleiters ausgebildet, je nachdem, in welche Richtung der Neutronenleiter gekippt ist. Zur Erhöhung des Anteils der in diesem Neutronenleiter reflektierten Neutronen ist es vorteilhaft, alle seine Innenflächen zu verspiegeln.

**[0014]** Die Neutronenleiter können einen vieleckigen Querschnitt aufweisen, vorzugsweise einen rechteckigen.

**[0015]** Die beiden Neutronenleiter können auch einen sich - nicht linear - verjüngenden und/oder erweiternden Querschnitt in zwei Dimensionen aufweisen.

**[0016]** Mindestens ein Neutronenleiter mit sich - nicht linear - verjüngendem und/oder erweiterndem Querschnitt ist als Halbellipse oder als Parabel ausgebildet. Er kann aber auch die Form eines Ellipsenabschnitts mit einer Länge größer als die große Halbachse aufweisen.

**[0017]** In einer anderen Ausführungsform ist vorgesehen, dass der erste und der zweite Neutronenleiter mit sich - nicht linear - verjüngendem oder erweiterndem Querschnitt die Form eines Abschnitts einer Ellipse mit einer Länge größer als die Länge der entsprechenden Halbellipse aufweisen, wobei das Aspektverhältnis von kleiner Halbachse zu großer Halbachse der beiden Ellipsenabschnitte konstant ist, und die mindestens eine als Spiegel ausgebildete Innenfläche des geraden Neutronenleiters im Fokus des ersten Ellipsenabschnitts in kleinem Winkel zur Strahlachse angeordnet ist, wobei dieser Winkel gleich dem arctan des Aspektverhältnisses ist. Die Länge des Neutronenleitersystems ist gleich der Summe der großen Achsen der beiden Ellipsen. Damit ist dieser Neutronenleiter gekippt zur anfänglichen Strahlachse angeordnet und verhindert eine direkte Sicht zur Neutronenquelle. Wie bereits erwähnt, ist eine Innenfläche des geraden Neutronenleiters als Spiegel ausgebildet, eine andere Fläche des geraden Neutronenleiters verläuft dazu parallel.

**[0018]** Eine spezielle Ausführungsform hierzu sieht zur Verringerung des Querschnitts des Neutronenleiters mit geraden Wänden in der Nähe des Fokus' vor, dass die der mindestens einen als Spiegel ausgebildeten Innenfläche gegenüberliegende Seitenfläche aus zwei symmetrischen Teilflächen gebildet ist und diese Teilflächen zum Fokus der ersten Ellipse hin geneigt sind. Die damit erreichte Verjüngung des Querschnitts beträgt im Fokus der ersten Halbellipse einige (ca. 4 bis 5) cm. Dicht benachbart zum Fokus - davor oder dahinter - kann nun ein Chopper positioniert werden, der es erlaubt, die Wellenlängenverteilung des Neutronenstrahls durch zeitlich wohl definierte Unterbrechungen zu beeinflussen.

**[0019]** In einer weiteren speziellen Ausführungsform

sind der erste und der zweite Ellipsenabschnitt als identische Halbellipsen ( $E_1, E_2$ ) ausgebildet und der gerade Neutronenleiter hat die Länge einer großen Ellipsenachse. Die Erfindung wird in folgendem Ausführungsbeispiel anhand von Figuren näher erläutert.

**[0020]** Dabei zeigen die Figuren

Fig. 1: schematisch ein erfindungsgemäßes Neutronenleitersystem in der Draufsicht mit je einer Ellipsenhälfte im ersten und im dritten Neutronenleiterabschnitt und einem im zweiten Abschnitt zwischen den beiden Ellipsenhälften angeordneten Neutronenleiter mit geraden Wänden, bei dem die mindestens eine als Spiegel ausgebildete Innenfläche zur Strahlachse gekippt ist;

Fig. 2: schematisch gemäß Fig. 1 ein ähnliches Neutronenleitersystem in der Draufsicht, jedoch ist die der mindestens einen als Spiegel ausgebildeten Innenfläche gegenüberliegende Seitenfläche aus zwei symmetrischen Teilflächen gebildet und diese Teilflächen sind zum Fokus geneigt.

**[0021]** Bei dem in Fig. 1 schematisch dargestellten Neutronenleitersystem haben beide Ellipsenhälften  $E_1$  und  $E_2$  jeweils eine Länge von einigen Metern bis über 100 m, hier von 37,5 m, und eine maximale Breite von einigen Zentimetern bis über 50 cm, hier von 20 cm. Die Gesamtlänge des Neutronenleitersystems beträgt von einigen Metern bis über 300 m, hier 150 m. Der Spiegel  $S$  des Neutronenleiters mit den geraden Wänden ist im Fokus  $F$  der ersten Ellipsenhälfte  $E_1$  angeordnet und um Winkel von  $0,01^\circ$  bis  $5^\circ$ , hier von  $0,1528^\circ$ , zur Strahlachse  $Z$  gekippt. Alle drei Neutronenleiter sind auf übliche Art miteinander verbunden, z. B. geklebt, und beispielsweise aus Glas gefertigt. Die Enden der Halbellipsen mit den kleineren Durchmessern weisen Beschichtungen mit höherem kritischen Winkel, wie z. B. Superspiegel, auf im Vergleich zu den Enden der Halbellipsen mit den größeren Durchmessern. Die erste Halbellipse  $E_1$  weist auf der Eintrittsseite des Neutronenstrahls aus der Quelle  $Q$  eine Öffnung von einigen Zentimetern, hier  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ , auf, auf der Austrittsseite von je nach Form der Ellipse deutlich mehr, hier von  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ . Für die dem - in diesem Beispiel 75 m langen - Neutronenleiter mit den geraden Wänden mit dem Spiegel  $S$  nachgeordnete und aus der Strahlachse  $Z$  gekippte Halbellipse  $E_2$  umfasst die Eintrittsöffnung die große und die Austrittsöffnung in Richtung Probe die kleine Fläche.

**[0022]** Im Vergleich zu Fig. 1 ist in Fig. 2 zur Verringerung des Querschnitts des Neutronenleiters mit den geraden Wänden die der mindestens einen als Spiegel  $S$  ausgebildeten Innenfläche gegenüberliegende Seitenfläche aus zwei symmetrischen Teilflächen  $T_1, T_2$  gebildet, weitere Angaben sind der Beschreibung zu Fig. 1 zu entnehmen. Die Teilflächen  $T_1, T_2$  sind zum Fokus  $F$  hin geneigt. Beide Teilflächen sind einige Meter bis über

100 m, hier 37,5 m lang, und weisen einen Winkel von 0,005° bis 5°, hier von 0,18°, zueinander auf. Ein bei dieser Anordnung der beiden Teilflächen entstehender Abschnitt des Neutronenleiters mit geraden Wänden und verringertem Querschnitt ermöglicht die Positionierung eines Choppers **C** vor (wie in der Figur 2 dargestellt) oder hinter dem Fokus **F**, mit dem - wie bereits beschrieben - die Wellenlängenverteilung des Neutronenstrahls durch zeitlich definierte Unterbrechungen beeinflusst wird.

**[0023]** In einem anderen Ausführungsbeispiel ist das Neutronenleiterstück mit geraden Wänden und verringertem Querschnitt im Neutronenleitersystem im Vergleich zu Fig. 2 verkürzt, wodurch die Divergenzverteilung der transmittierten Neutronen homogener wird. Die beiden Neutronenleiterabschnitte mit sich - nicht linear - änderndem Querschnitt müssen nun aber um die Hälfte der Verkürzung des Neutronenleiters mit geraden Wänden verlängert werden und haben jeweils eine Länge von einigen Metern bis über 100 m, im konkreten Beispiel von 60 m, und eine maximale Breite von einigen bis über 50 cm, hier von 10 cm. Diese Neutronenleiterabschnitte weisen sowohl einen sich - nicht linear - verjüngenden als auch einen sich - nicht linear - erweiternden Abschnitt auf und haben nunmehr jeweils eine Länge, die größer ist als die Halbachse der Ellipse. Die Gesamtlänge des Neutronenleitersystems beträgt von einigen Metern bis über 300 m, hier - ebenso wie in Fig. 2 - von 150 m. Die verkürzten und zum Fokus **F** geneigten Teilflächen **T1**, **T2** des geraden Neutronenleiters sind in diesem Beispiel je 15 m lang, je nach Ausführung kann diese Länge zwischen einigen Metern bis über 100 m variieren. Weitere Parameter sind der Beschreibung zu Fig. 2 zu entnehmen.

**[0024]** In beiden Figuren ist erkennbar, dass die direkte Sicht vom Auftreffort auf die Quelle mit kostengünstigen Mitteln unterbrochen ist, wodurch aufwändige und teure Abschirmungen gespart werden können. In dem erfindungsgemäßen Neutronenleitersystem wurden mehr Neutronen transmittiert als vergleichsweise in einer aus dem Stand der Technik bekannten Anordnung mit zwei Ellipsen und einem Strahlstopp.

### Patentansprüche

1. Neutronenleitersystem für Neutronen mit einer Wellenlänge  $> 0,1 \text{ \AA}$ , aufweisend eine Quelle zur Erzeugung von Neutronen und mindestens zwei Neutronenleiter mit sich - nicht linear - verjüngendem und/oder erweiterndem Querschnitt und einem zwischen den beiden Neutronenleitern angeordneten Neutronenleiter mit geraden Wänden, wobei die kleine Öffnung des ersten Neutronenleiters mit sich - nicht linear - änderndem Querschnitt und die große Öffnung des zweiten Neutronenleiters mit sich - nicht linear - änderndem Querschnitt jeweils dem aus der Quelle austretenden Neutronenstrahl zugewandt sind,

### dadurch gekennzeichnet, dass

mindestens eine Innenfläche des Neutronenleiters mit geraden Wänden als Spiegel ausgebildet ist, auf den der aus dem ersten Neutronenleiter mit sich - nicht linear - änderndem Querschnitt austretende Neutronenstrahl fällt,

der mindestens eine Spiegel in einem kleinen Winkel von 0,01 ° bis 5 ° zur Neutronenstrahlachse angeordnet ist, und

der zweite Neutronenleiter mit sich - nicht linear - änderndem Querschnitt im Strahlengang der vom Neutronenleiter mit geraden Wänden transmittierten Neutronen angeordnet ist.

2. Neutronenleitersystem nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der mindestens eine Spiegel auf einer vertikalen oder horizontalen Innenfläche des geraden Neutronenleiters ausgebildet ist.
3. Neutronenleitersystem nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** alle Innenflächen des Neutronenleiters mit geraden Wänden verspiegelt sind.
4. Neutronenleitersystem nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** alle Neutronenleiter einen vieleckigen Querschnitt aufweisen, vorzugsweise einen rechteckigen.
5. Neutronenleitersystem nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die beiden Neutronenleiter einen sich nicht linear verjüngenden und/oder erweiternden Querschnitt in zwei Dimensionen aufweisen.
6. Neutronenleitersystem nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** mindestens ein Neutronenleiter mit sich - nicht linear - änderndem Querschnitt als Halbellipse ausgebildet ist.
7. Neutronenleitersystem nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** mindestens ein Neutronenleiter mit sich - nicht linear - änderndem Querschnitt als Ellipsenabschnitt mit einer Länge größer als die große Halbachse ausgebildet ist.
8. Neutronenleitersystem nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** mindestens ein Neutronenleiter mit sich - nicht linear - änderndem Querschnitt als Parabel ausgebildet ist.
9. Neutronenleitersystem nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der erste und der zweite Neutronenleiter mit sich -

nicht linear - änderndem Querschnitt die Form eines Abschnitts einer Ellipse mit einer Länge größer als die Länge einer entsprechenden Halbellipse aufweisen, wobei das Aspektverhältnis von kleiner Halbachse zu großer Halbachse der beiden Ellipsenabschnitte konstant ist, und die mindestens eine als Spiegel (S) ausgebildete Innenfläche des Neutronenleiters mit geraden Wänden durch den Fokus des ersten Ellipsenabschnitts verläuft, wobei der Winkel des Spiegels (S) zur Neutronenstrahlachse gleich dem arctan des Aspektverhältnisses eingestellt ist, und die Länge des Neutronenleitersystems gleich der Summe der großen Achsen der beiden Ellipsen ist.

5

10

15

10. Neutronenleitersystem nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass**

zur Verringerung des Querschnitts des Neutronenleiters mit geraden Wänden die der mindestens einen als Spiegel (S) ausgebildeten Innenfläche gegenüberliegende Seitenfläche aus zwei symmetrischen Teilflächen (T1, T2) gebildet ist und diese Teilflächen (T1, T2) zum Fokus (F) des ersten Ellipsenabschnitts hin geneigt sind.

20

25

11. Neutronenleitersystem nach Anspruch 9 und 10, **dadurch gekennzeichnet, dass**

der erste und der zweite Ellipsenabschnitt als identische Halbellipsen ( $E_1, E_2$ ) ausgebildet sind und der Neutronenleiter mit geraden Wänden die Länge einer großen Ellipsenachse aufweist.

30

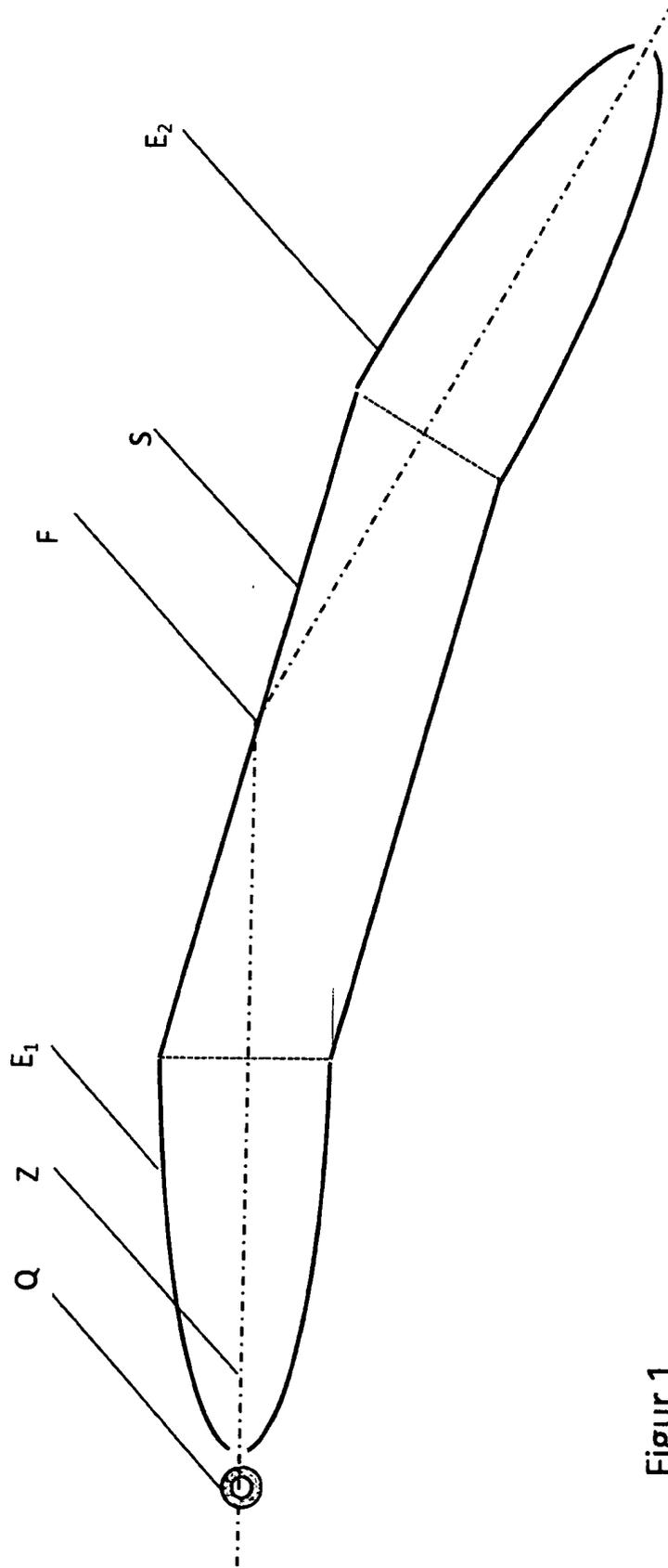
35

40

45

50

55



Figur 1

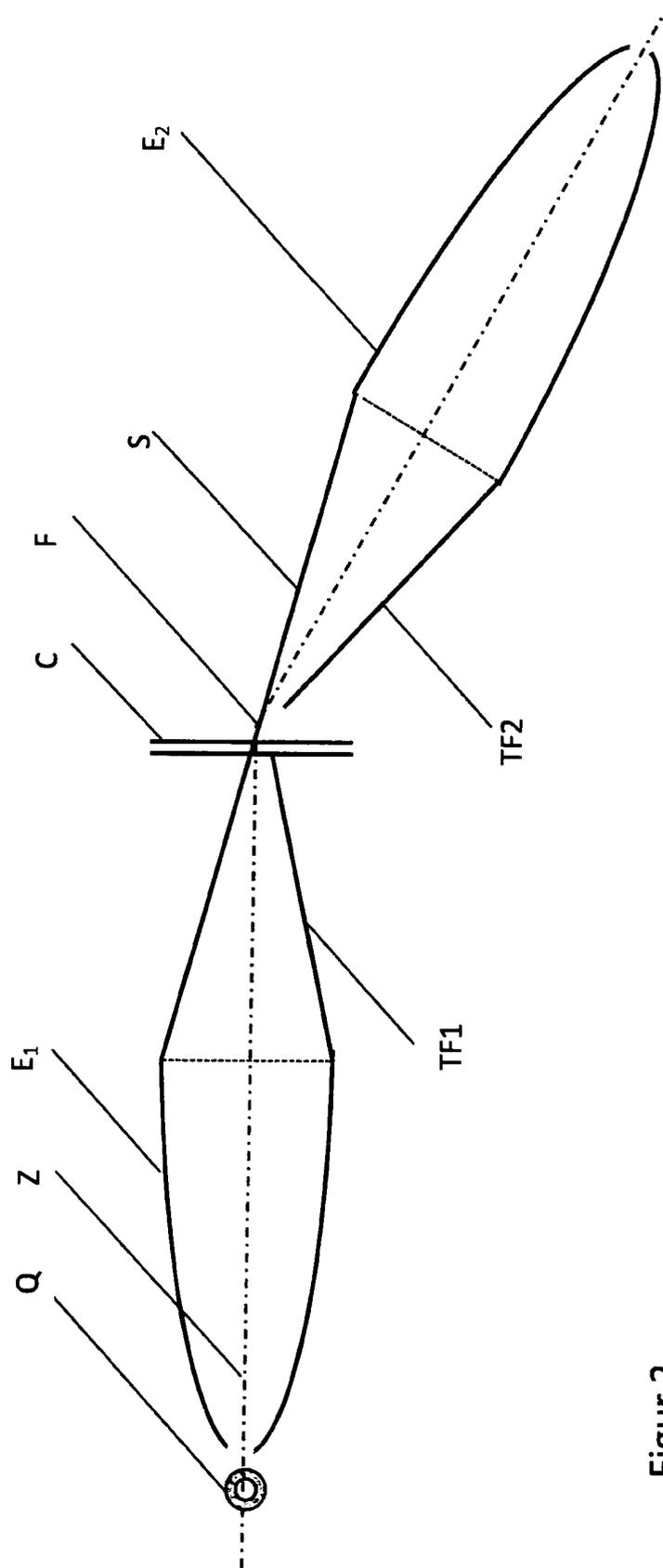


Figure 2

## 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 Nicht-Patentliteratur

- **SCHANZER et al.** *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2004, vol. 529, 63-68 **[0003]**
- **BENTLEY et al.** *Correction of Optical Aberrations in Elliptic Neutron Guides*, 20. Januar 2012 **[0004]**
- *International Workshop on Neutron Optics*, 17. März 2010 **[0005]**
- **MARTIN-RODRIGUEZ.** *Properties of elliptic guides for neutron beam transport and potential application for new instrumentation* **[0005]**
- **BÖNI et al.** Shielding of elliptic guides with direct sight to the moderator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2010, vol. 624, 162-167 **[0006]**
- *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2011, vol. 634, S100-S103 **[0007]**
- **BÖNI.** *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2008, vol. 586, 1-8 **[0008]**