



(10) **DE 10 2014 006 985 B4** 2017.02.02

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2014 006 985.0**
(22) Anmeldetag: **08.05.2014**
(43) Offenlegungstag: **12.11.2015**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **02.02.2017**

(51) Int Cl.: **F24J 2/18 (2006.01)**

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

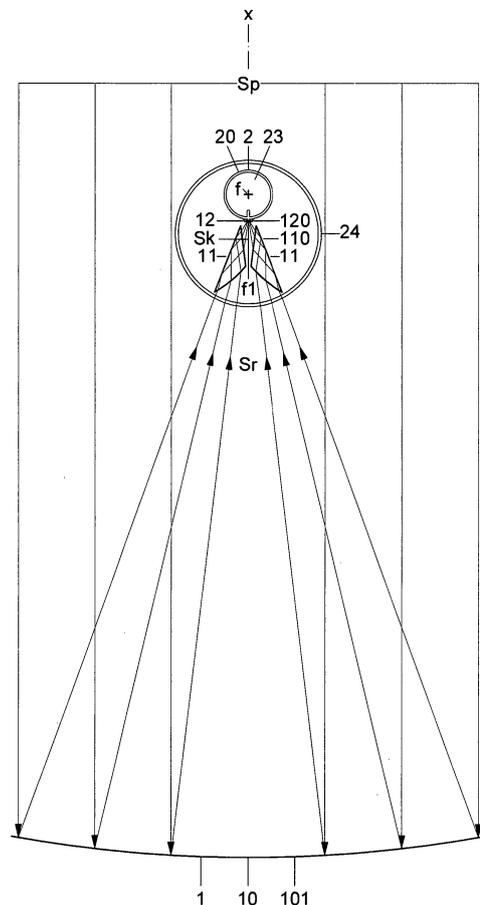
(73) Patentinhaber:
Grimm, Friedrich, 70376 Stuttgart, DE;
Herkommer, Alois, Prof. Dr., 73431 Aalen, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:
siehe Folgeseiten

(72) Erfinder:
Grimm, Friedrich, 70376 Stuttgart, DE

(54) Bezeichnung: **Parabolrinnenkollektor mit einem Sekundärkonzentrator und einem Empfängerelement**

(57) Hauptanspruch: Parabolrinnenkollektor (1) bestehend aus einem primären Konzentratorelement (10) mit einer Brennlinie (f), einem sekundären Konzentratorelement (11) und einem Empfängerelement (12), welche Elemente (10, 11, 12) untereinander eine unverschiebbliche Einheit bilden und welches sekundäre Konzentratorelement (11) bei einachsiger Nachführung des Parabolrinnenkollektors (1) um die Drehachse (x) zum jeweiligen Sonnenstand die tages- und jahreszeitlich in unterschiedlichen Winkeln einfallenden parallelen Strahlenbündel (Sp) der Sonne auf PV-Zellen (120) bündelt, wobei das sekundäre Konzentratorelement (11) konzentrisch zur Brennlinie (f) des primären Konzentratorelements (10) angeordnet ist und Prismen (110) aufweist, die die von dem primären Konzentratorelement (10) auf die Brennlinie (f) konzentrierten radialen Strahlen (Sr) in mindestens einem konvergenten Strahlenbündel (Sk) auf eine Brennlinie (f1) oder in einer Vielzahl von konvergenten Strahlenbündeln (Sk) auf eine Vielzahl von mit einem radialen Abstand konzentrisch um die Brennlinie (f) angeordnete Brennlinien (f1–fn) fokussieren und die Brennlinien (f1–fn) auf der äußeren Mantelfläche eines Wärmeübertragers (2) liegen.



(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	197 18 044	C1
DE	27 38 667	A1
DE	27 38 920	A1
DE	44 30 517	A1
DE	103 05 428	A1
DE	197 32 481	A1
DE	10 2009 046 061	A1
DE	10 2011 078 300	A1
US	4 432 345	A
EP	0 767 889	A1
WO	2010/ 075 850	A2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen einachsigen zum jeweiligen Sonnenstand nachführbaren Sonnenkollektor mit einem primären und einem sekundären Konzentratorelement, sowie einem Empfängerelement. Das primäre Konzentratorelement wird bevorzugt von einer verspiegelten Parabolrinne gebildet, während das sekundäre Konzentratorelement eine Prismen- oder Spiegelanordnung aufweist. Das Empfängerelement ist an der Oberfläche eines Wärmeübertragers angeordnet und besteht bei einem solarthermischen Sonnenkollektor aus Längsnuten, die in die Oberfläche eines Wärmeübertragers eingelassen sind und bei einem photovoltaischen Hybridkollektor aus PV-Zellen, die an der Oberfläche des Wärmeübertragers auf mindestens einer Brennlinie des sekundären Konzentratorelements angeordnet sind und auf ihrer strahlungsabgewandten Seite wärmeleitend mit dem Wärmeübertrager verbunden sind. Der Wärmeübertrager selbst ist entweder als ein von einem Wärmeträgerfluid direkt durchströmtes Absorberrohr oder als Druckbehälter, der einen Zweiphasen-Thermosyphon aufnimmt, ausgebildet. Das sekundäre Konzentratorelement besteht aus einer Anordnung von Prismen oder Spiegeln, die die von einem primären Konzentratorelement als radiale Strahlen auf eine Brennlinie fokussierten Sonnenstrahlen auf eine Vielzahl von Brennlinien an der äußeren Oberfläche eines Wärmeübertragers konzentrieren. Bei einem solarthermischen Kollektor liegen diese Brennlinien innerhalb von parallel zu den Brennlinien angeordneten Längsnuten, die in ein Absorberrohr eingelassen sind. Bei einem photovoltaischen Hybridkollektor sind spezielle PV-Zellen unmittelbar auf den Brennlinien des sekundären Konzentratorelements angeordnet. In einer bevorzugten Ausführungsvariante der Erfindung sind die PV-Zellen als mehrfach dotierte Stapelsolarzellen mit einem Wirkungsgrad von bis zu 44,7% ausgebildet und sind nur wenige Millimeter groß.

Stand der Technik

[0002] Parabolrinnenkollektoren werden im kraftwerkstechnischen Maßstab eingesetzt, um Sonnenlicht auf ein Absorberrohr zu konzentrieren. Mit einer Aperturweite des Parabolspiegels von bis zu acht Metern und mit einem Absorberrohr von nur 95 mm Durchmesser wird eine circa 80-fache Konzentration des Sonnenlichts erzielt, wobei die Parabolrinne und das Absorberrohr von einer Tragkonstruktion aus Stahl so präzise zueinander ausgerichtet sind, dass 98% der eingestrahlten Solarenergie auf das Absorberrohr konzentriert werden. Die Winkelabweichungen des Spiegelnormalenvektors von seiner idealen Richtung dürfen auch unter den Betriebslasten aus Windbeanspruchung und Eigengewicht nur wenige Millirad betragen. Strukturverformungen eines Parabolrinnenkollektors können entsprechend dem Stand der Technik in engen Grenzen gehalten werden, sodass auch bei sehr großen Aperturweiten eine präzise Konzentration des Sonnenlichts auf ein Empfängerelement möglich ist. Eine absorbierende Beschichtung auf der Oberfläche des Absorberrohrs wandelt die eingestrahlte elektromagnetische Energie der Sonne in thermische Energie, die unter Vermeidung von Wärmeverlusten durch ein konzentrisch um das Absorberrohr angeordnetes transparentes Hüllrohr mit einem Vakuum zwischen dem Absorberrohr und dem transparenten Hüllrohr auf ein in dem Wärmeträgerrohr geführtes Wärmeträgerfluid übertragen wird. Bei Parabolrinnenkraftwerken besteht das Wärmeträgerfluid, z. B. aus einem Silikonöl, das auf bis zu 400°C erhitzt wird, um zur Stromerzeugung Wasserdampf für Turbinen bereitzustellen. Der Gesamtwirkungsgrad derartiger Parabolrinnenkraftwerke beträgt heute circa 14–20%.

[0003] Bei den als PV-Zellen bezeichneten Solarzellen handelt es sich im Rahmen der Erfindung um mehrfach dotierte Solarzellen, die auch als Stapelsolarzellen bekannt sind. Die von der Firma SOITEC hergestellten Stapelsolarzellen erreichen bei einer 300- bis 500-fachen Konzentration des Sonnenlichts einen Wirkungsgrad von bis zu 44,7% und sind nur etwa 2×2 mm groß. Stapelsolarzellen der Firma AZURsolar erreichen bei einer tausendfachen Konzentration des Sonnenlichts auf eine nur 3×3 mm große Fläche einen Wirkungsgrad von bis zu 40%. Derartige Mehrfach-Solarzellen bestehen aus Halbleitermaterialien der Gruppen III und V des Periodensystems, die in einem sog. Waferbond-Verfahren untereinander so verbunden werden, dass die Grenzflächen zwischen den einzelnen Schichten stromführend ausgebildet werden können. Die französische Firma „SOITEC“ stellt Solaranlagen her, die den hohen Wirkungsgrad der Stapelsolarzellen im kraftwerkstechnischen Maßstab nutzen. Dabei wird eine Vielzahl von Kollektormodulen, die jeweils aus einer Fresnel-Linse und einer Stapelsolarzelle bestehen auf einer Trägerfläche angeordnet, die zweiachsig zur Sonne ausrichtbar ist. Die Tatsache, dass diese Solarzellen im Kraftwerksbetrieb nur etwa die Hälfte der unter Laborbedingungen gemessenen Leistung erreichen, liegt an dem Leistungsverlust der Solarzellen, der sich infolge einer ungenügenden Kühlung bei hohen Temperaturen einstellt. Außerdem ist die Tragkonstruktion der Kollektormodule ebenfalls großen Temperaturschwankungen unterworfen, wobei thermisch bedingte Längenänderungen an dem Konzentratorensystem auftreten, die mit den hohen Anforderungen einer präzisen Konzentration des Sonnenlichts auf die nur wenige Millimeter großen Stapelsolarzellen nicht vereinbar sind.

[0004] Bei bekannten Parabolrinnenkollektoren erfolgt die Wärmeübertragung von dem Absorberrohr auf ein Wärmeträgerfluid vornehmlich durch Wärmeleitung aber auch durch Wärmestrahlung und Konvektion. Um ei-

ne möglichst gleichmäßige Wärmeübertragung sicherzustellen, sollte der Wärmeeintrag auf das Absorberrohr möglichst allseitig erfolgen, was bei einem herkömmlichen Parabolrinnenkollektor nicht der Fall ist, da der Wärmeeintrag von der einstrahlungsabgewandten Seite her erfolgt. Ein Wärmerohr nutzt die Verdampfungsenthalpie einer Flüssigkeit beim Phasenwechsel von flüssig zu gasförmig und umgekehrt von gasförmig zu flüssig, wobei das Wärmerohr selbst als ein mit einem Unterdruck beaufschlagter, gegenüber der Atmosphäre hermetisch abgeschlossener und mit einem Arbeitsmedium befüllter Druckbehälter ausgebildet ist, um die Verdampfungstemperatur des Arbeitsmediums herabzusetzen. Eine besonders vorteilhafte Bauart eines Wärmerohrs stellt ein sog. Zweiphasen-Thermosyphon dar, bei dem die Wärmeübertragung durch ein phasenwechselndes Arbeitsmedium erfolgt, das zwischen einer Wärmequelle am unteren Ende und einer Wärmesenke am oberen Ende des Druckbehälters seine Phase wechselt und dabei Wärmeenergie auf ein Wärmeträgerfluid überträgt. Bei Wärmeeintrag an der Wärmequelle verdampft das Arbeitsmedium, kondensiert an der Wärmesenke und fließt unter dem Einfluss der Schwerkraft wieder zurück zur Wärmequelle am unteren Ende des Druckbehälters, um erneut zu verdampfen. Für die Übertragung der Wärme von einer Wärmequelle auf ein Wärmeträgerfluid, das z. B. in einem berippten Wärmeträgerrohr am oberen Ende des Druckbehälters angeordnet ist, wird die Verdampfungsenthalpie des phasenwechselnden Arbeitsmediums genutzt. Bei einem angenommenen Temperaturunterschied von 50°C zwischen dem Wärmeträgerfluid und der Wärmequelle beträgt die Wärmeleistung eines handelsüblichen berippten Wärmeträgerrohrs z. B. 4 kW pro Meter Rohr. Bekannte Absorberrohre aus Metall bestehen z. B. aus Kupfer, Aluminium oder auch aus Stahl und tragen auf ihrer äußeren Mantelfläche eine absorbierende Beschichtung. Eine Schwarzchrom-Schicht mit Einlagerungen von metallischen Partikeln in Chromoxid weist eine mikrorauhe Oberfläche auf und zeichnet sich durch Absorptionsgrade von 90–98% aus. Titanoxinitrid, das auf eine metallische Oberfläche aufgedampft wird emittiert nur etwa 5–6% der absorbierten Strahlung. Bei bekannten Röhrenkollektoren besteht das Hüllrohr aus einem eisenarmen Kalknatronglas oder Borosilicatglas, das sich durch eine hohe solare Transmission und geringe Herstellungskosten auszeichnet. Das Hüllrohr kann aber auch aus einem transparenten Kunststoff Polymethylmethacrylat (PMMA) hergestellt werden. Prismen werden bevorzugt aus einem eisenarmen Kalknatronglas oder aus Borosilicatgals hergestellt. Ein profiliertes Glasrohr kann aber auch in einem Ziehglasverfahren wirtschaftlich hergestellt werden. Im Falle vom Kunststoff können Extrusionsverfahren zum Einsatz kommen, bei denen Polymethylmethacrylat (PMMA) oder aber auch Polycarbonat zu Profilquerschnitten extrudiert werden. Bei Parabolrinnenkollektoren haben sekundäre Konzentratorelemente, die z. B. aus einem einstrahlungsseitig angeordneten Spiegel bestehen, die Aufgabe das von einer verspiegelten Parabolrinne oder von einem Fresnel-Spiegel fokussierte Licht noch präziser auf ein Absorberrohr zu bündeln.

[0005] Die US 4 432 345 A zeigt einen solarthermischen Parabolrinnenkollektor mit einem primären und einem sekundären Konzentratorelement. Das sekundäre Konzentratorelement ist als eine einstrahlungsseitig angeordnete gefaltete Blechschale dazu ausgebildet Lichtstrahlen eines, von der Parabolrinne radial zentrierten Strahlenbündels, die das auf der Brennlinie des Parabolspiegels angeordnete Absorberrohr verfehlen, auf das Absorberrohr zu reflektieren.

[0006] Die EP 0 767 889 B1 zeigt einen röhrenförmigen Sonnenkollektor als thermischen und oder photovoltaischen Kollektor mit einem primären und einem sekundären Konzentratorelement. Das primäre Konzentratorelement besteht aus einem transparenten Hüllrohr, das auf seiner der Einstrahlung zugewandten Innenseite Prismen trägt, die die parallel einfallende Strahlung der Sonne auf ein Empfängerelement bündeln. Das sekundäre Konzentratorelement ist bei diesem Sonnenkollektor innerhalb des transparenten Hüllrohrs angeordnet und dient dazu, Lichtstrahlen des parallelen Strahlenbündels der Sonne, die von den Prismen nicht auf das Empfängerelement gelenkt werden, auf das Empfängerelement zu reflektieren.

[0007] Die DE 103 05 428 B4 zeigt einen Parabolrinnenkollektor mit einem das Absorberrohr konzentrisch umgebenden, transparenten Hüllrohr, das auf seiner der Einstrahlung zugewandten Innenseite Prismen trägt, die dazu ausgebildet sind, die parallel einfallenden Strahlenbündel der Sonne, die im Zwischenraum zwischen dem transparenten Hüllrohr und dem Absorberrohr durch das transparenten Hüllrohr abgelenkt werden, durch Beugung und oder Brechung auf das Absorberrohr zu lenken. Strahlen, die von den Randbereichen des Parabolspiegels nicht präzise genug auf das Absorberrohr gebündelt werden, können, sofern sie noch innerhalb des von dem transparenten Hüllrohr definierten Einstrahlungskorridors liegen, auf das Absorberrohr gelenkt werden.

[0008] Die DE 10 2009 046 061 A1 zeigt die vakuumdichte Verbindung zwischen einem Absorberrohr und einem transparenten Hüllrohr, dass das Absorberrohr konzentrisch umgibt, für einen solarthermischen Parabolrinnenkollektor, der im kraftwerkstechnischen Maßstab zur Stromerzeugung eingesetzt wird.

[0009] Die DE 27 38 667 A1 zeigt einen solarthermischen Parabolrinnenkollektor mit einer Isolierung zwischen einem äußeren transparenten Hüllrohr und einem inneren, mediendurchströmten Absorberrohr.

[0010] Die DE 44 30 517 A1 zeigt einen Parabolrinnenkollektor, bei dem das Wärmeträgerrohr als Verdampferrohr ausgebildet ist und von einem Absorberschirm umgeben wird.

[0011] Die DE 10 2011 078 300 A1 zeigt einen Parabolrinnenkollektor, der unmittelbar auf thermoelektrische Wandler an der Oberfläche eines Verdampferrohrs fokussiert. Ein sekundäres Konzentratorelement ist hier nicht vorgesehen.

[0012] Die DE 197 18 044 C1 zeigt einen solarthermischen Parabolrinnenkollektor mit zwei getrennten Kreisläufen für ein Wärmeträgermedium, bei dem die Sonnenstrahlen über ein transparentes Linsenrohr auf ein Absorberrohr gebündelt werden, wobei ein geschlossener Sekundärkreislauf vorgesehen ist, in dem ein zweites Wärmeträgermedium zirkuliert und die Wärmeverluste eines zweiten Kollektors aufnimmt und auf die Niedrigtemperaturseite des Primärkreislaufs überträgt.

[0013] Die DE 27 38 920 A1 zeigt einen konzentrierenden Sonnenkollektor mit einem Absorber, der mit Reflexionskörpern ausgestattet ist, die die streuende oder von dem Absorberkörper abstrahlende Strahlung auf den Absorberkörper umlenken.

[0014] Die DE 197 32 481 A1 zeigt einen Röhrenkollektor mit einem transparenten Hüllrohr und einem Absorberrohr. Das transparente Hüllrohr trägt Prismen und in seinem Innenraum einen rinnenförmigen Spiegel, welche Prismen und welcher Spiegel dazu ausgebildet sind, die Sonnenstrahlen auf das mediendurchströmte Absorberrohr zu bündeln.

[0015] Die WO 2010/075 850 A2 zeigt einen Parabolrinnenkollektor mit einem Absorberrohr und einem mehrschalig aufgebauten, transparenten Hüllrohr. Durch einen hitzefesten Silikonkleber werden die Mantelteile des Hüllrohrs gasdicht untereinander verbunden.

Aufgabenstellung

[0016] Es ist die Aufgabe der Erfindung einen Parabolrinnenkollektor zu finden, der die tages- und jahreszeitlich bedingt in unterschiedlichen Winkeln einfallenden Strahlenbündel der Sonne bei einachsiger Nachführung zum jeweiligen Stand der Sonne mittels eines sekundären Konzentratorelements, das von Prismen oder Spiegeln gebildet wird, 300–1000-fach auf ein Empfängerelement an der Oberfläche eines Wärmeübertragers zu konzentrieren. Diese Aufgabe wird durch die in Anspruch 1 genannten Merkmale der Erfindung gelöst. Weitere besonders vorteilhafte Ausgestaltungsmöglichkeiten der Erfindung gehen aus den Unteransprüchen hervor. Besteht das Empfängerelement eines Parabolrinnenkollektors aus einer Vielzahl von Stapelsolarzellen, die in Reihen auf der Oberfläche eines Wärmeübertragers angeordnet sind, kann der hohe Konzentrationsfaktor von 300–1000 Sonnen zur Belichtung der Stapelsolarzellen genutzt werden. Die nur etwa 2×2 mm bis 4×4 mm großen Stapelsolarzellen zeichnen sich durch einen Wirkungsgrad von bis zu 44,7% aus und sind an ihrer strahlungsabgewandten Seite wärmeleitend und elektrisch isoliert durch Wärmebrücken mit einem Wärmeübertrager verbunden. In einer Ausführungsvariante der Erfindung besteht der Wärmeübertrager aus einem Absorberrohr und überträgt die an den Solarzellen absorbierte Wärme durch Wärmeleitung auf ein in dem Absorberrohr zirkulierendes Wärmeträgerfluid. In einer besonders vorteilhaften Ausgestaltungsvariante der Erfindung ist der Wärmeübertrager als Zweiphasen-Thermosyphon mit einem Druckbehälter ausgebildet. Dabei bildet die untere, der direkten Sonneneinstrahlung abgewandte Hälfte des Druckbehälters die Wärmequelle, während die obere Hälfte des Druckbehälters eine Vielzahl berippter, von einem Wärmeträgerfluid durchströmter Wärmeträgerrohre aufnimmt und die Wärmesenke des Zweiphasen-Thermosyphon bildet. Eine Strömungsleiteneinrichtung im Inneren eines Druckbehälters stellt sicher, dass das in seiner Flüssigphase von den berippten Wärmeträgerrohren abtropfende Arbeitsmedium die Wärmequelle möglichst vollflächig benetzt. Deshalb ist eine Dampfbremse als flüssigkeitsdichte aber dampfdurchlässige Membran aus Metall vorgesehen, die mit einem Abstand zu dem Druckbehälter angeordnet ist und einen Zwischenraum bildet, in dem sich das Arbeitsmedium in seiner Flüssigphase sammelt. Eine derartige Dampfbremse kann aus einem feinmaschigen Metallgewebe oder alternativ aus einer nanoporösen Metallfolie, z. B. aus Edelstahl hergestellt werden. Bei Wärmeeintrag seitens der Stapelsolarzellen auf der Außenseite des Druckbehälters verdampft das Arbeitsmedium, je nach der chemischen Zusammensetzung des Mediums selbst, bereits ab 20–30°C und entwickelt dabei einen Dampfdruck, der die Dampfbremse durchlässig werden lässt. Durch den Dampfdruck steigt das Arbeitsmedium in einem zentralen Bereich des Arbeitsraums zu den berippten Wärmeträgerrohren auf, kondensiert bei Wärmeübertragung auf das in den Wärmeträgerrohren zirkulierende Wärmeträgerfluid und wird unter

dem Einfluss der Schwerkraft wieder zu der Wärmequelle auf der Innenseite des Druckbehälters geleitet. Als Wärmeübertrager ist der Zweiphasen-Thermosyphon besonders effektiv, da die Verdampfungsenthalpie des phasenwechselnden Arbeitsmediums sowohl beim Übergang von flüssig zu gasförmig als auch umgekehrt, beim Übergang von gasförmig zu flüssig, zweimal genutzt werden kann. Als Arbeitsmedium zur Befüllung des mit einem Restluftdruck von 1–10 mbar beaufschlagten Arbeitsraums kommen Wasser, Ammoniak, Methyl, Methanol, Ethanol oder ein Kohlenwasserstoff aus dem Bereich der Isopentane in Frage. Die Kombination einer präzise konzentrierenden Parabolrinne, die bei einer Aperturweite von circa 8 m eine 80-fache Konzentration des Sonnenlichts auf ein Absorberrohr mit etwa 95 mm Durchmesser ermöglicht, mit einem sekundären Konzentratorelement, das in der bevorzugten Ausführungsvariante von Prismen gebildet wird, ermöglicht eine 500–1000-fache Konzentration des Sonnenlichts auf Brennlinsen, die an der Oberfläche des Wärmeübertragers angeordnet sind. Beträgt die Aperturweite der Parabolrinne z. B. 8 m und nimmt man an sechs Brennlinsen einen Brennstreifen von jeweils 3 mm an, wird das Sonnenlicht ca. 400-fach konzentriert. Mit der dargestellten Konzentratortechnik kann auch eine bis zu 1000-fache Konzentration des Sonnenlichts erzielt werden, indem weniger Brennlinsen auf der Oberfläche des Absorberrohrs angeordnet werden. Die Erfindung löst auch das Problem der elektrischen Kontaktierung der nur Millimeter großen Stapelsolarzellen, die auf parallel zu den Brennlinsen angeordnete Sammelleitungen aufgesteckt werden und den an den Solarzellen gewonnen Gleichstrom ableiten. Auf der strahlungsabgewandten Seite der Stapelsolarzellen kommt der effektivste Mechanismus der Wärmeübertragung in Form eines Zweiphasen-Thermosyphons zum Einsatz. Ein etwa 1 m langes beripptes Wärmeträgerrohr mit 10 mm Durchmesser hat eine Wärmeleistung von etwa 4 kW pro Laufmeter Rohr bei einer angenommenen Temperaturdifferenz von 50°C zwischen der Wärmequelle und dem Wärmeträgerfluid. Im Falle eines Zweiphasen-Thermosyphons befindet sich die Wärmequelle in der unteren Hälfte eines zylinderförmigen Druckbehälters, während die obere Hälfte z. B. sechs berippte Wärmeträgerrohre als Wärmesenke aufnimmt. Pro Laufmeter Länge eines Parabolrinnenkollektors steht also eine Wärmeleistung von 24 kW für die Kühlung der Solarzellen zur Verfügung. Bei einer angenommenen Energieeinstrahlung von 8 kW pro Meter können maximal 3,2 kW in elektrische Energie gewandelt werden, während etwa 4,8 kW als Wärme auf ein Wärmeträgerfluid übertragen werden. Ein transparentes Hüllrohr, das zwischen der ringförmigen angeordneten Prismen des sekundären Konzentratorelements und dem Absorberrohr angeordnet ist, verhindert Wärmeverluste und ermöglicht eine vollständige Übertragung der an den Solarzellen absorbierten Wärme auf ein Wärmeträgerfluid. Damit gelingt es, fast die Hälfte der auf eine vorgegebene Apertur eingestrahltene elektromagnetische Energie der Sonne in Strom umzuwandeln, während die andere Hälfte als Prozesswärme ebenfalls genutzt werden kann. Ein transparentes Hüllrohr, das konzentrisch und koaxial mit einem evakuierten Zwischenraum um einen Wärmeübertrager angeordnet ist, isoliert die Prismen eines sekundären Konzentratorelements und ermöglicht deren kostengünstige Herstellung aus Kunststoff. Unter dem Oberbegriff "Prismen" sind im Rahmen der Erfindung unterschiedliche Anordnungsmöglichkeiten für radial um die Brennlinie eines primären Konzentratorelements angeordnete Prismen zusammengefasst. Eine erste Prismenanordnung besteht aus einer Vielzahl von Dreiecksprismen, mindestens jedoch aus zwei spiegelbildlich zueinander angeordneten Dreiecksprismen, die die radialen Strahlen eines primären Konzentratorelements durch Brechung an den Eintrittsseiten, durch Totalreflexion im Inneren der Dreiecksprismen und durch abermalige Brechung an den Austrittsseiten auf eine Brennlinie an der Oberfläche eines Wärmeübertragers fokussieren. Wenn der Einfallswinkel und der Ausfallswinkel an einem totalreflektierenden Dreiecksprisma identisch sind, bleibt die Fokussierung bei tages- und jahreszeitlich unterschiedlichen Einfallswinkeln der Sonne erhalten. Unerwünschte Strahl- ablenkungen heben sich einander gegenseitig auf.

[0017] Eine zweite Prismenanordnung betrifft eine zur Einstrahlungsseite offene Prismenrinne, bei der eine Vielzahl von Prismen in einer radialen Anordnung um die Brennlinie eines primären Konzentratorelements untereinander verbunden sind. Im Falle von rautenförmigen Prismen mit planebenen Seiten erfolgt die Konzentration auf eine Vielzahl von Brennlinsen durch zweimalige Brechung der Sonnenstrahlen an den einzelnen rautenförmigen Prismen. Im Falle von Freiform-Prismen können die dem primären Konzentratorelement zugewandten Seiten der Prismen eine einachsige Krümmung aufweisen. Die Anzahl der äußeren, den radialen Strahlen eines primären Konzentratorelements zugewandten Prismenseiten kann ein Vielfaches der inneren, dem Wärmeübertrager zugewandten Prismenseiten betragen, wobei auch hier der Einfallswinkel am Einfallslot den gleichen Betrag hat wie der Ausfallswinkel am Ausfallslot.

[0018] Eine dritte Prismenanordnung betrifft ein konzentrisch und koaxial zu der Brennlinie eines primären Konzentratorelements angeordnetes Prismenrohr, das wie die Prismenrinne aus einer Vielzahl von einzelnen Prismen aufgebaut ist, die untereinander zu einem allseitig geschlossenen Prismenrohr verbunden sind. Eine vierte Prismenanordnung betrifft ein Polygonrohr, bei dem einzelne Freiform-Prismen mit einer planebenen ausgebildeten Innenseite und einer gewölbt ausgebildeten Außenseite zu einem geschlossenen Polygonrohr verbunden sind. Im speziellen Fall eines Polygonrohrs mit einer zylindrischen Außenfläche werden die radialen Strahlen beim Eintritt in das Polygonrohr bzgl. ihrer Ausrichtung auf die Brennlinie eines primären Konzentra-

torelements nicht gebrochen. Erst beim Austritt aus dem Polygonrohr an einer planeben ausgebildeten inneren Seite des Polygonrohrs werden die radialen Strahlen gebrochen und auf eine Brennlinie an der Oberfläche eines Wärmeübertragers fokussiert. Dabei entspricht die Anzahl der Polygonseiten der Anzahl der Brennlinien an der Oberfläche des Wärmeübertragers, während der Abstand der Prismen zu dem Wärmeübertrager von der Brechzahl des Glases abhängt, aus dem das Polygonrohr besteht. Die Außenseite eines Polygonrohrs, das aus einer Vielzahl von Freiform-Prismen aufgebaut ist, kann einachsige gekrümmte, konvexe Wölbungen aufweisen.

[0019] Weist das sekundäre Konzentratorelement eine Anordnung von Spiegeln auf, sind folgende Ausführungsvarianten möglich: Mindestens zwei V-förmige und spiegelbildlich zueinander angeordnete Spiegel bilden eine Spiegeleinheit und fokussieren die radialen Strahlen eines primären Konzentratorelements durch Mehrfachreflexion auf eine Brennlinie an der Oberfläche eines Wärmeübertragers. Eine Spiegeleinheit kann aber auch aus einer Vielzahl fächerförmig angeordneter Spiegel bestehen, die jeweils durch Einfachreflexion die radialen Strahlen auf eine oder mehrere Brennlinien an der Oberfläche eines Wärmeübertragers fokussieren. Die Spiegel selbst können durch gebogene Metallklammern mit einem Wärmeübertrager verbunden werden, wobei ein transparentes Hüllrohr vorgesehen ist, das die Spiegel vor Verschmutzung schützt. Durch ein Vakuum zwischen dem Wärmeübertrager und dem transparenten Hüllrohr wird die Wärme weitgehend verlustfrei auf ein Wärmeträgerfluid übertragen. Sind die Spiegel in ein Glasrohr eingebettet, kann dieses Glasrohr selbst als transparentes Hüllrohr ausgebildet werden. Bei einem solarthermischen Parabolrinnenkollektor besteht das Empfängerelement aus einer Vielzahl von Längsnuten, die in die Oberfläche eines Absorberrohrs eingelassen sind. Die sehr hohen Temperaturen, die mit einer 500–1000-fachen Konzentration des Sonnenlichts ermöglicht werden, treten an einer Vielzahl von Brennlinien auf, die innerhalb der Längsnuten eines Absorberrohrs liegen. Die äußere Oberfläche dieser Längsnuten trägt eine absorbierende Beschichtung, die das Sonnenlicht im Wellenlängenbereich von $0,3\ \mu\text{m}$ – $1,8\ \mu\text{m}$ absorbiert und zum Beispiel aus Schwarzchrom mit einem Absorptionsgrad von 95% und einem Emissionsgrad von 12% oder aus Schwarznickel mit einem Absorptionsgrad von 97% und einem Emissionsgrad von 10–20% oder aus Titanoxinitrid mit einem Absorptionsgrad von 95% und einem Emissionsgrad von 5% besteht. Diese Längsnuten bilden auf der Innenseite des Absorberrohrs Längsrippen, die dazu ausgebildet sind, die an der absorbierenden Schicht gewonnene Wärme möglichst gleichmäßig auf ein Wärmeträgerfluid zu übertragen. Zur Vermeidung von Wärmeverlusten wird das Absorberrohr von einem transparenten Hüllrohr umgeben, wobei zwischen beiden Rohren ein Vakuum vorgesehen ist.

[0020] Bei einer besonders vorteilhaften Ausführungsvariante der Erfindung besteht das primäre Konzentratorelement des Parabolrinnenkollektors aus einer einstrahlungsseitig vor dem Empfängerelement angeordneten Prismenfolie, die die parallel einfallenden Strahlenbündel der Sonne auf eine Brennlinie fokussiert. Diese Folie trägt eine Vielzahl dreiecksförmiger Prismen, die so ausgestaltet sind, dass der Einfallswinkel eines Lichtstrahls zum Einfallslot den gleichen Betrag aufweist, wie der Ausfallswinkel zum Ausfallslot. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass auch schräg einfallende Lichtstrahlen exakt die Brennlinie der Prismenfolie treffen. Streuende Strahlabweichungen heben sich einander gegenseitig auf. Kombiniert man eine Prismenfolie mit einer verspiegelten Parabolrinne, können die Prismen auf einer Folie mit regelmäßigen Abständen zueinander angeordnet werden, sodass etwa die Hälfte der parallel einfallenden Strahlenbündel der Sonne durch die transparente Prismenfolie auf die verspiegelte Parabolrinne gelangt. In diesem Fall kann ein sekundäres Konzentratorelement radiale Lichtstrahlen allseitig auf voneinander beabstandete Längsnuten in einem Absorberrohr konzentrieren. Auf diese Weise wird eine effektive und gleichmäßige Übertragung der Wärme auf ein Wärmeträgerfluid sichergestellt.

[0021] Typische Ausgestaltungen und Anwendungsmöglichkeiten der Erfindung gehen aus den in den Figuren dargestellten Ausführungsbeispielen hervor.

[0022] Es zeigen:

[0023] Fig. 1 zeigt einen Parabolrinnenkollektor mit einem sekundären Konzentratorelement, das aus zwei Prismen besteht in einem schematischen Querschnitt

[0024] Fig. 2 zeigt den Strahlengang durch die Prismen des in Fig. 1 dargestellten Parabolrinnenkollektors im Querschnitt

[0025] Fig. 3 zeigt die auf einer Brennlinie in Reihe angeordneten Stapelsolarzellen als Empfängerelemente des in den Fig. 1 und Fig. 2 dargestellten Parabolrinnenkollektors in der perspektivischen Übersicht

- [0026]** Fig. 4 zeigt den Ausschnitt eines Kollektorfelds mit lückenlos angeordneten Parabolrinnenkollektoren, die um eine vertikale Drehachse zur Sonne ausgerichtet werden in einer schematischen Perspektive
- [0027]** Fig. 5 zeigt den Ausschnitt eines Kollektorfelds, bei dem die Parabolrinnenkollektoren parallel mit einem Abstand zueinander angeordnet sind und mit einer horizontalen Drehachse zur Sonne ausgerichtet werden, in einer schematischen Perspektive
- [0028]** Fig. 6 zeigt einen Parabolrinnenkollektor mit einer Prismenrinne als sekundäres Konzentratorelement in einem schematischen Querschnitt
- [0029]** Fig. 7 zeigt den Strahlengang durch die Prismenrinne nach Fig. 6 in einem Teilquerschnitt
- [0030]** Fig. 8 zeigt den Parabolrinnenkollektor nach Fig. 6 und Fig. 7 im Querschnitt
- [0031]** Fig. 9 zeigt den Parabolrinnenkollektor nach Fig. 6–Fig. 8 in einer perspektivischen Ausschnittsdarstellung
- [0032]** Fig. 10 zeigt einen Parabolrinnenkollektor mit einer Prismenrinne im schematischen Querschnitt
- [0033]** Fig. 11 zeigt den Parabolrinnenkollektor nach Fig. 9 mit Prismenrinne, Wärmeübertrager und Empfängerelementen im Querschnitt
- [0034]** Fig. 12 zeigt den Parabolrinnenkollektor nach Fig. 10 und Fig. 11 in einer perspektivischen Ausschnittsdarstellung
- [0035]** Fig. 13 zeigt ein Polygonrohr als sekundäres Konzentratorelement, ein Zweiphasen-Thermosyphon als Wärmeübertrager und PV-Zellen als Empfängerelemente eines Parabolrinnenkollektors im Querschnitt
- [0036]** Fig. 14 zeigt den Parabolrinnenkollektor nach Fig. 13 in einer perspektivischen Ausschnittsdarstellung
- [0037]** Fig. 15 zeigt ein Polygonrohr mit Freiform-Prismen als sekundäres Konzentratorelement, ein Zweiphasen-Thermosyphon als Wärmeübertrager und PV-Zellen als Empfängerelemente eines Parabolrinnenkollektors im Querschnitt
- [0038]** Fig. 16 zeigt den Parabolrinnenkollektor nach Fig. 15 in einer perspektivischen Ausschnittsdarstellung
- [0039]** Fig. 17 zeigt einen solarthermischen Parabolrinnenkollektor mit einem Prismenrohr als sekundärem Konzentratorelement in einem schematischen Übersichtsquerschnitt
- [0040]** Fig. 18 zeigt einen solarthermischen Parabolrinnenkollektor mit einer verspiegelten Parabolrinne und einer Prismenfolie als primärem Konzentratorelement und einem Prismenrohr als sekundärem Konzentratorelement in einem schematischen Übersichtsquerschnitt
- [0041]** Fig. 19 zeigt ein Prismenrohr mit rautenförmigen Prismen als sekundäres Konzentratorelement, ein Absorberrohr als Wärmeübertrager und Längsnuten als Empfängerelemente eines solarthermischen Parabolrinnenkollektors im Querschnitt
- [0042]** Fig. 20 zeigt ein Prismenrohr mit rautenförmigen Prismen als sekundäres Konzentratorelement, ein Absorberrohr als Wärmeübertrager und PV-Zellen als Empfängerelemente eines solarthermischen und photovoltaischen Parabolrinnenkollektors im Querschnitt
- [0043]** Fig. 21 zeigt ein Spiegelrohr als sekundäres Konzentratorelement, ein Zweiphasen-Thermosyphon als Wärmeübertrager und PV-Zellen als Empfängerelemente eines solarthermischen und photovoltaischen Parabolrinnenkollektors im Querschnitt
- [0044]** Fig. 22 zeigt den Parabolrinnenkollektor nach Fig. 21 in einer perspektivischen Übersichtsdarstellung
- [0045]** Fig. 1 zeigt das Zusammenwirken eines Kreissegmentspiegels **101** als primäres Konzentratorelement **10** mit einem sekundären Konzentratorelement **11**, das von zwei dreiecksförmigen Prismen **110** gebildet wird. Die Brennlinie f des Kreissegmentspiegels **101** wird durch den halben Kreisradius definiert. An der äußeren

Mantelfläche des Wärmeübertragers **2**, der aus einem Absorberrohr **20** besteht, ist das Empfängerelement **12** in Form von einer Vielzahl von PV-Zellen **120** angeordnet. Der dargestellte Strahlengang zeigt, wie ein paralleles Strahlenbündel S_p der Sonne von dem primären Konzentratorelement **10** als radiale Strahlen S_r auf die Brennnlinie f des Kreissegmentspiegels **101** reflektiert wird. Die Prismen **110** konzentrieren die radialen Strahlen S_r in einem konvergenten Strahlenbündel S_k auf eine Brennnlinie f_1 , die an der äußeren Mantelfläche des Absorberrohrs **20** liegt. Bei dem hier dargestellten Parabolrinnenkollektor **1** beträgt der Öffnungswinkel des Kreissegmentspiegels **101** etwa 20 Grad und gleicht damit einer flachen Parabel.

[0046] Fig. 2 zeigt den Strahlengang durch die Prismen **110** eines sekundären Konzentratorelements **11**. Die Prismen **110** sind als totalreflektierende Dreiecksprismen ausgebildet. Die radialen Strahlen S_r durchqueren das transparente Hüllrohr **24** und werden beim Eintritt in ein Prisma **110** gebrochen und an der nächsten Prismenseite totalreflektiert, um an der Austrittsseite des Prismas **110** erneut gebrochen zu werden. Unter der Bedingung, dass der Einfallswinkel α gegenüber dem Einfallslot den gleichen Betrag aufweist wie der Ausfallswinkel δ gegenüber dem Ausfallslot werden die Strahlen des konvergenten Strahlenbündels S_k auch bei unterschiedlichen Einfallswinkeln der Sonne exakt auf eine Brennnlinie f_1 an der Oberfläche des Wärmeübertragers **2** fokussiert. Für eine möglichst genaue Fokussierung auf die Brennnlinie f_1 sind die Einstrahlungsseiten der Prismen **110** leicht gewölbt. Eine Vielzahl von PV-Zellen **120**, die als nur wenige Millimeter große Stapelsolarzellen ausgebildet sind, bilden an der Oberfläche des Wärmeübertragers **2** das Empfängerelement **12** des Parabolrinnenkollektors **1**. An ihren strahlungsabgewandten Seiten sind die PV-Zellen **120** über eine Wärmebrücke **200** mit einer Innenrippe **201** des als Absorberrohr **20** ausgebildeten Wärmeübertragers **2** verbunden. Das Absorberrohr **20** überträgt die Wärme über die Innenrippen **201** unmittelbar auf ein Wärmeträgerfluid **23**, wodurch einerseits die PV-Zellen **120** gekühlt werden und andererseits die auf das Wärmeträgerfluid **23** übertragene Wärme genutzt werden kann.

[0047] Fig. 3 zeigt die auf einer Brennnlinie f_1 angeordneten PV-Zellen **120** einschließlich der elektrischen Kontakte mit Kathode (+), Anode (-) und Sammelleitungen **205**, die parallel zu der Brennnlinie f_1 an der äußeren Mantelfläche des Absorberrohrs **20** angeordnet und von dem Absorberrohr **20** durch einen Isolator **204** getrennt sind. Mittels von Steckverbindungen können Kathode (+) und Anode (-) der PV-Zellen **120** auf einfachste Weise in Reihe auf der Brennnlinie f_1 angeordnet werden. Dabei können Module von 500–1000 PV-Zellen **120** gebildet werden wobei der an einem Modul gewonnene Strom in Abständen von einem oder mehreren Metern durch nicht näher dargestellte Querleitungen ausgekoppelt wird.

[0048] Fig. 4 zeigt eine lückenlose Anordnung mehrerer zueinander paralleler Parabolrinnenkollektoren **1**, bei denen das primäre Konzentratorelement **10**, das sekundäre Konzentratorelement **11** und das Empfängerelement **12** jeweils eine in sich unverdrehbare Einheit bilden und um eine vertikale, senkrecht zu den Brennnlinien f angeordnete Drehachse x zur Sonne ausgerichtet werden. Um die Parabolrinnenkollektoren **1** zur Sonne auszurichten wird eine derartige, beliebig große Kollektorfläche in einem Azimutlager gedreht, das bei einer schwimmenden Solaranlage von einer Wasseroberfläche gebildet wird.

[0049] Fig. 5 zeigt Parabolrinnenkollektoren **1**, die parallel und mit einem Abstand zueinander angeordnet sind. Dieser Abstand ist notwendig, damit sich die Parabolrinnenkollektoren **1** bei der Nachführung zum jeweiligen Sonnenstand um horizontale, parallel zu den Brennnlinien f angeordnete Drehachsen x nicht gegenseitig verschatten. Diese Anordnung eignet sich sowohl für eine Nord-Süd- als auch für eine Ost-West-Ausrichtung der Parabolrinnenkollektoren **1**.

[0050] Fig. 6 zeigt die zweistufige Konzentration eines parallel einfallenden Strahlenbündels S_p der Sonne in einer ersten Stufe durch eine verspiegelte Parabolrinne **100** als primäres Konzentratorelement **10** und in einer zweiten Stufe durch eine einstrahlungsseitig offene Prismenrinne **111** als sekundäres Konzentratorelement **11**. Das Größenverhältnis der einzelnen Komponenten des Parabolrinnenkollektors **1** ist im Sinne der Lesbarkeit der Zeichnung nicht maßstäblich dargestellt. Bei einer Aperturweite der verspiegelten Parabolrinne **100** von bis zu 8 m beträgt der Durchmesser des Absorberrohrs **20** nur etwa 95 mm.

[0051] Fig. 7 zeigt den Strahlengang an einem exemplarischen Sektor des in Fig. 6 in einer Übersicht gezeigten Parabolrinnenkollektors **1**. Die radialen Strahlen S_r werden beim Durchtritt durch die Prismenrinne **111** zweimal gebrochen. Die strahlungszugewandten Seiten der Prismen **110** sind schwalbenschwanzförmig ausgebildet und weisen eine leichte konvexe Krümmung auf, wobei der Einfallswinkel α am Einfallslot im Wesentlichen denselben Betrag hat wie der Ausfallswinkel δ am Ausfallslot, sodass es auch bei unterschiedlichen Einfallswinkeln der Sonne nicht zu einer Verschiebung der Brennnlinien f_1 – f_5 kommt. Auf den Brennnlinien f_1 – f_5 ist eine Vielzahl von PV-Zellen **120** als Empfängerelement **12**, wie in Fig. 3 dargestellt, in Reihe angeordnet. Sammelleitungen **205** verlaufen als Kathode (+) und Anode (-) parallel zu den Brennnlinien f_1 – f_5 .

[0052] Fig. 8 zeigt den Querschnitt durch den von einem transparenten Hüllrohr **24** umgebenen Wärmeübertrager **2** nach Fig. 6 und Fig. 7. Der Wärmeübertrager **2** weist einen Zweiphasen-Thermosyphon mit einem Druckbehälter **21** auf. Zwischen dem transparenten Hüllrohr **24** und dem Druckbehälter **21** sind Prismen **110**, die untereinander zu einer Prismenrinne **111** verbunden sind, angeordnet. Als sekundäres Konzentratorelement **11** konzentrieren die Prismen **110** die radialen Strahlen S_r in einer Vielzahl von konvergenten Strahlenbündeln S_k auf insgesamt sieben mit einem radialen Abstand konzentrisch zu der Brennnlinie f angeordnete Brennnlinien f_1 – f_7 an der äußeren Mantelfläche des Wärmeübertragers **2**. Auf den Brennnlinien f_1 – f_7 selbst ist, wie in Fig. 3 gezeigt, eine Vielzahl von PV-Zellen **120** als Empfängerelement **12** in Reihe geschaltet und an Sammelleitungen **205** mit Kathode (+) und Anode (–) angeschlossen. Der Zweiphasen-Thermosyphon ist in den als Zylinderrohr **202** ausgebildeten Druckbehälter **21** integriert und dient der Ableitung der an den PV-Zellen **120** anfallenden Wärmelast. In der oberen Hälfte des Druckbehälters **21** sind insgesamt sechs berippte Wärmeträgerrohre **212** angeordnet, die von einem Wärmeträgerfluid **23** durchströmt werden und die Wärmesenke **211** des Zweiphasen-Thermosyphons bilden, während die untere Hälfte des Druckbehälters **21** eine Strömungsleiteneinrichtung **22** aufnimmt und die Wärmequelle **210** des Zweiphasen-Thermosyphons bildet. Die Strömungsleiteneinrichtung **22** umfasst ein Leitblech **220** für das in seiner Flüssigphase von den berippten Wärmeträgerrohren **212** abtropfende Arbeitsmedium, das von dem Leitblech **220** in einen Zwischenraum **221** zwischen der Innenseite des Druckbehälters **21** und einer konzentrisch zu dem Druckbehälter **21** angeordneten Dampfbremse **222** geleitet wird. Bei Wärmeeintrag seitens der PV-Zellen **120** verdampft das Arbeitsmedium und gelangt als Dampf durch mikroporöse Öffnungen in der Dampfbremse **222** in den Arbeitsraum **225** des Zweiphasen-Thermosyphons. Durch Dampfdurchtrittsöffnungen **223** in dem Leitblech **220** steigt der Dampf in die obere Hälfte des Druckbehälters **21**, um erneut an den berippten Wärmeträgerrohren **212** zu kondensieren. Der Zweiphasen-Thermosyphon ist für eine Ausrichtung zum Sonnenstand mit vertikaler Drehachse x entsprechend der in Fig. 4 dargestellten Kollektoranordnung vorgesehen.

[0053] Fig. 9 zeigt den in Fig. 8 dargestellten Querschnitt als perspektivische Abschnittdarstellung, aus der die Funktionsweise des in einen Druckbehälter **21** integrierten Zweiphasen-Thermosyphons noch deutlicher hervorgeht. In der oberen Hälfte des Druckbehälters **21** sind berippte Wärmeträgerrohre **212** angeordnet, die von einem Wärmeträgerfluid **23** durchströmt werden, und bilden die Wärmesenke **211** des Zweiphasen-Thermosyphons. Die untere Hälfte des Druckbehälters **21** bildet die Wärmequelle **210** des Zweiphasen-Thermosyphons und nimmt eine Strömungsleiteneinrichtung **22** auf. Die Wärmequelle **210** befindet sich auf der Innenseite des Druckbehälters **21**. Das als Kondensat von dem berippten Wärmeträgerrohren **212** abtropfende Arbeitsmedium sammelt sich in einem Zwischenraum **221** zwischen einer konzentrisch zu dem Druckbehälter **21** angeordneten Dampfbremse **222** und der Innenseite des Druckbehälters **21**. Da die Dampfbremse **222** wasserdicht aber dampfdurchlässig ausgebildet ist, bedarf es eines gewissen Dampfdrucks, damit das Arbeitsmedium als Dampf die Dampfbremse passieren kann und in den zentralen Arbeitsraum des Zweiphasen-Thermosyphons einströmt, um durch Dampfdurchtrittsöffnungen **223** zu den berippten Wärmeträgerrohren **212** aufzusteigen. Der in ein Zylinderrohr **202** integrierte Zweiphasen-Thermosyphon ist für die in Fig. 4 dargestellte Anordnung von Parabolrinnenkollektoren **1** mit vertikaler Drehachse x geeignet.

[0054] Fig. 10 zeigt den schematischen Querschnitt durch einen Parabolrinnenkollektor **1**, der der in Fig. 5 dargestellten Anordnung entspricht. Der Wärmeübertrager **2** weist bei diesem Beispiel einen Druckbehälter **21** auf, der im Querschnitt als Flachovalrohr **203** ausgebildet ist. Das Zusammenwirken der verspiegelten Parabolrinne **100** als primäres Konzentratorelement **10** mit den Prismen **110** als sekundäres Konzentratorelement **11** und den PV-Zellen **120** als Empfängerelemente **12** wird in Fig. 11 näher erläutert.

[0055] Fig. 11 zeigt einen Wärmeübertrager **2**, der einen in ein Flachovalrohr **203** integrierten Zweiphasen-Thermosyphon aufweist. Die Strömungsleiteneinrichtung **22** des Zweiphasen-Thermosyphons ermöglicht eine Ausrichtung des Parabolrinnenkollektors **1** zum jeweiligen Sonnenstand durch Verschwenken um eine horizontale Drehachse x . Bis zu einem Grenzwinkel von etwa 25 Grad gegenüber der Horizontalen ist sichergestellt, dass das als Flüssigphase von den berippten Wärmeträgerrohren **212** abtropfende Arbeitsmedium von der Strömungsleiteneinrichtung **22** in den Zwischenraum **221** zwischen der Innenseite des Flachovalrohrs **203** und der konzentrisch dazu angeordneten Dampfbremse **222** geleitet wird. Um die Innenseite des Druckbehälters **21** im Bereich der auf den Brennnlinien f_1 – f_7 angeordneten PV-Zellen **120** mit der Flüssigphase des Arbeitsmediums vollständig zu benetzen, ist eine kapillare Struktur **224** in dem Zwischenraum **221** vorgesehen. Wie in Fig. 12 gezeigt, bildet eine verspiegelte Parabolrinne **100** das primäre Konzentratorelement **10** des Parabolrinnenkollektors **1**. Sechs rautenförmige und zwei dreiecksförmige Prismen **110** mit planebenen Seiten sind untereinander zu einer Prismenrinne **111** verbunden und bilden das sekundäre Konzentratorelement **11** des Parabolrinnenkollektors **1**. Die randständigen dreiecksförmige Prismen **110** sind jeweils als totalreflektierende Prismen **110** ausgebildet. Als dritte Konzentratorenstufe sind Reflektoren **206** an den den PV-Zellen **120**

zugekehrten Oberflächen der Sammelleitungen **205** vorgesehen, sodass alle Strahlen eines konvergenten Strahlenbündeln S_k auf eine der Brennlinsen f_1 – f_7 konzentriert werden.

[0056] Fig. 12 zeigt den Parabolrinnenkollektor **1** nach Fig. 10 und Fig. 11, dessen Wärmeübertrager **2** von einem in ein Flachovalrohr **203** integrierten Zweiphasen-Thermosyphon gebildet wird. Am oberen Ende des Flachovalrohrs **203** bilden insgesamt sechs von einem Wärmeträgerfluid **23** durchströmte, berippte Wärmeträgerrohre **212** die Wärmesenke **211** des Zweiphasen-Thermosyphons. Am unteren Ende des Flachovalrohrs **203** befindet sich die Wärmequelle **210** des Zweiphasen-Thermosyphons, die von auf ihrer strahlungsabgewandten Seite über Wärmebrücken **200** mit dem Flachovalrohr **203** verbundenen PV-Zellen **120** gebildet wird. Wie in Fig. 11 gezeigt sind die PV-Zellen **120** auf insgesamt sieben Brennlinsen f_1 – f_7 angeordnet und mit dem Flachovalrohr **203** über Wärmebrücken **200** verbunden. Konzentrisch zur strahlungsabgewandten Innenseite des Flachovalrohrs **203** ist eine flüssigkeitsdichte und dampfdurchlässige Dampfbremse **222** angeordnet. Bei Wärmeeintrag seitens der PV-Zellen **120** gelangt das Arbeitsmediums als Dampf in den zentralen Arbeitsraum **225** und steigt über Dampfdurchtrittsöffnungen **223** am oberen Ende der Strömungsleiteneinrichtung **22** zu den berippten Wärmeträgerrohren **212** auf, wo es kondensiert und als Flüssigkeit erneut in den Zwischenraum **221** zwischen der Innenseite des Druckbehälters **21** und der Dampfbremse **222** geleitet wird.

[0057] Fig. 13 zeigt den Querschnitt durch einen Parabolrinnenkollektor **1**, bei dem das sekundäre Konzentratorelement **11** von einem Polygonrohr **113** gebildet wird, dessen einstrahlungsseitige Außenkontur zylinderförmig ausgebildet ist, während die Innenkontur auf ihrer einer verspiegelten Parabolrinne zugewandten Seite polygonal ausgebildet ist und sieben planebene Prismenseiten aufweist. Radiale Strahlen S_r ändern beim Eintritt in das Polygonrohr **113** ihre radiale Ausrichtung nicht und werden von den Prismenflächen an der Innenseite des Prismenrohrs zu sieben konvergenten Strahlenbündeln S_k ausgerichtet und auf insgesamt sieben Brennlinsen f_1 – f_7 konzentriert. Auf den Brennlinsen f_1 – f_7 sind PV-Zellen **120** angeordnet, die auf ihrer strahlungsabgewandten Seite über Wärmebrücken **200** mit einem Wärmeübertrager **2** verbunden sind. Wie in Fig. 8 und Fig. 9 erläutert, ist der Wärmeübertrager **2** als ein in ein Zylinderrohr **202** integrierter Zweiphasen-Thermosyphon ausgebildet.

[0058] Fig. 14 zeigt den Parabolrinnenkollektor **1** nach Fig. 13 in einer perspektivischen Abschnittdarstellung. Zwischen dem Absorberrohr **20** und dem Polygonrohr **113** ist ein Vakuum \underline{V} vorgesehen, um die an den PV-Zellen **120** absorbierte Wärme möglichst verlustfrei auf ein in den berippten Wärmeträgerrohren **212** zirkulierendes Wärmeträgerfluid **23** zu übertragen.

[0059] Fig. 15 zeigt ein Parabolrinnenkollektor **1**, dessen sekundäres Konzentratorelement **11** von einem Polygonrohr **113** und dessen Wärmeübertrager **2** von einem Zweiphasen-Thermosyphon und dessen Empfänger-element **12** von einer Vielzahl von PV-Zellen **120** gebildet wird. Das sekundäre Konzentratorelement **11** besteht aus insgesamt sieben radial um die Brennlinie f eines primären Konzentratorelements angeordneten Freiform-Prismen **110**, deren den radialen Strahlen S_r zugewandten Seiten eine konvexe Wölbung aufweisen, während die dem Wärmeübertrager **2** zugewandten Seiten ein achteckiges Polygon bilden. Die Freiform-Prismen **110** können auch als Linearlinsen bezeichnet werden und sind untereinander zu einem Polygonrohr **113** verbunden. Jedes der sieben Freiform-Prismen **110** fokussiert die radialen Strahlen S_r präzise auf Brennlinsen f_1 – f_7 an der Oberfläche des Wärmeübertragers **2**. Auf den Brennlinsen f_1 – f_7 selbst ist eine Vielzahl von, den konvergenten Strahlen S_k zugewandten PV-Zellen **120** angeordnet. Auf ihrer strahlungsabgewandten Seite sind die PV-Zellen **120** über Wärmebrücken **200** mit dem Druckbehälter **21**, der von einem Zylinderrohr **202** gebildet wird, verbunden. In der unteren Hälfte des Zylinderrohrs **202** befindet sich die Wärmequelle **210** und in der oberen Hälfte des Zylinderrohrs **202** die Wärmesenke **211** des Zweiphasen-Thermosyphons. Das physikalische Prinzip der Wärmeübertragung entspricht dem in den Fig. 8 und Fig. 9 erläuterten Beispiel.

[0060] Fig. 16 zeigt die in Fig. 15 erläuterte Anordnung eines Polygonrohrs **113** als sekundäres Konzentratorelement **11** und eines in den Druckbehälter **21** integrierten Zweiphasen-Thermosyphons als Wärmeübertrager **2**. Eine Vielzahl von PV-Zellen **120** ist, wie in Fig. 15 gezeigt, den Brennlinsen f_1 – f_7 zugeordnet. Die Dampfbremse **222** ist in der unteren Hälfte des Zweiphasen-Thermosyphons konzentrisch zu dem Zylinderrohr **202** angeordnet und bildet einen Zwischenraum **221**, in dem sich die Flüssigphase eines phasenwechselnden Arbeitsmediums sammelt. Die Dampfbremse **222** besteht entweder aus einem mikroporösen Metallblech oder aus einem Metallgewebe, die jeweils wasserdicht aber dampfdurchlässig sind. Zwischen dem z. B. aus Borosilikatglas gezogenen Polygonrohr **113** und dem Druckbehälter **21** ist ein Vakuum \underline{V} vorgesehen, sodass die von den PV-Zellen **120** absorbierte Wärme möglichst vollständig auf das in den sechs berippten Wärmeträgerrohren **212** geführte Wärmeträgerfluid **23** übertragen wird.

[0061] Fig. 17 zeigt den schematischen Querschnitt durch einen Parabolrinnenkollektor **1** als solarthermischen Kollektor mit einer zweistufigen Konzentratortechnik. Das primäre Konzentratorelement **10** weist eine verspiegelte Parabolrinne **100** auf, die die parallelen Strahlenbündel S_p der Sonne als radiale Strahlen S_r auf die Brennlinie f der Parabolrinne **100** fokussiert. Das sekundäre Konzentratorelement **11** weist Prismen **110** auf, die auf der der Parabolrinne **100** zugewandten Seite untereinander zu einem Prismenrohr **112** verbunden sind, das die radiale Strahlen S_r auf insgesamt sechs Brennlinien konzentriert. Die Brennlinien sind, wie in Fig. 19 gezeigt, innerhalb von Längsnuten **121** an der äußeren Oberfläche des Absorberrohrs **20** angeordnet.

[0062] Fig. 18 zeigt den schematischen Querschnitt durch einen solarthermischen Parabolrinnenkollektor **1**, bei dem das primäre Konzentratorelement **10** eine Kombination aus einer verspiegelten Parabolrinne **100** und einer einstrahlungsseitig angeordneten Prismenfolie **102** mit einer gemeinsamen Brennlinie f gebildet wird. Dreiecksförmige Prismen sind mit einem horizontalen Abstand zueinander auf der Prismenfolie **102** so angeordnet, dass eine erste Hälfte des parallelen Strahlenbündels S_p der Sonne auf die Brennlinie f konzentriert wird, während eine zweite Hälfte des parallelen Strahlenbündels S_p von der Prismenfolie **102** durchgelassen und von der verspiegelten Parabolrinne **100** auf die Brennlinie f konzentriert wird. Das Prismenrohr **112** kann deshalb als gleichmäßig mit Prismen **110** besetztes Sternrohr ausgebildet werden. Der Vorteil einer allseitigen Konzentration des parallelen Strahlenbündels S_p der Sonne auf ein Prismenrohr **112** wird in Fig. 19 näher erläutert.

[0063] Fig. 19 zeigt den Querschnitt durch das in Fig. 18 beschriebene Prismenrohr **112** aus rautenförmigen Prismen **110** mit planebenen ausgebildeten Prismenseiten. Der Wärmeübertrager **2** ist als Absorberrohr **20** mit einer gewellten Außen- und Innenkontur ausgebildet. Das Empfängerelement **12** weist zwölf Längsnuten **121** mit einer absorbierenden Beschichtung **122** in der äußeren Mantelfläche des Absorberrohrs **20** auf. Die Brennlinien f_1 – f_{12} des Prismenrohrs **112** sind innerhalb der Längsnuten **121** angeordnet. Die allseitige Wärmeübertragung von dem Absorberrohr **20** auf ein Wärmeträgerfluid **23** ist besonders effektiv.

[0064] Fig. 20 zeigt einen Parabolrinnenkollektor **1** als photovoltaischen und solarthermischen Kollektor mit einer dreistufigen Konzentratortechnik. Wie in Fig. 18 erläutert, besteht das primäre Konzentratorelement **10** aus der Kombination einer Prismenfolie **102** und einer verspiegelten Parabolrinne **100**, während das sekundäre Konzentratorelement **11** von einem allseitig das Absorberrohr **20** umschließenden Prismenrohr **112** aus rautenförmigen Prismen **110** mit planebenen Prismenseiten gebildet wird. Die dritte Konzentratorenstufe wird von Reflektoren **206** an den den PV-Zellen **120** zugewandten Oberflächen der Sammelleitungen **205** gebildet. Die dreistufige Konzentratortechnik ermöglicht eine Fokussierung der parallelen Strahlenbündel der Sonne auf insgesamt zwölf nur 2–3 mm breite Brennlinien f_1 – f_{12} .

[0065] Fig. 21 zeigt den Teilquerschnitt durch einen Parabolrinnenkollektor **1**, der in seinem Aufbau der in Fig. 4 dargestellten Übersicht entspricht. Der Wärmeübertrager **2** weist einen Druckbehälter **21** auf, der von einem Zylinderrohr **202** gebildet wird und den Arbeitsraum **225** für einen Zweiphasen-Thermosyphon bildet. Die auf die Brennlinie f einer verspiegelten Parabolrinne **100** zentrierten radialen Strahlen S_r werden bei diesem Ausführungsbeispiel der Erfindung von einem Spiegelrohr **115** auf insgesamt sechs Brennlinien f_1 – f_6 an der einstrahlungsabgewandten Seite des Zylinderrohrs **202** fokussiert. Insgesamt sechs Spiegeleinheiten, die jeweils aus einer Vielzahl von fächerförmig angeordneten, ebenen Spiegeln **114** aufgebaut und auf die Brennlinien f_1 – f_6 ausgerichtet sind, konzentrieren die radialen Strahlen S_r durch einfache Reflexion an jedem einzelnen Spiegel **114** zu konvergenten Strahlenbündeln S_k , die auf die Brennlinien f_1 – f_6 gerichtet sind. In der oberen Hälfte des Zylinderrohrs **202** bilden insgesamt sechs berippte Wärmeträgerrohre **212** die Wärmesenke **211** des Zweiphasen-Thermosyphons. In der unteren Hälfte des Zylinderrohrs **202** bildet die innere Oberfläche des Zylinderrohrs **202** die Wärmequelle **210** des Zweiphasen-Thermosyphons und ist über Wärmebrücken **200** mit der strahlungsabgewandten Seite der PV-Zellen **120** an der äußeren Mantelfläche des Zylinderrohrs **202** verbunden. Das als Kondensat von den berippten Wärmeträgerrohren **212** abfließende Arbeitsmedium sammelt sich in einem Zwischenraum **221** zwischen der Innenseite des Zylinderrohrs **202** und einer konzentrisch zu dem Zylinderrohr angeordneten Strömungsleiteinrichtung **22**. Die Strömungsleiteinrichtung **22** weist eine Dampfbremse **222** auf, durch die das Arbeitsmedium bei Wärmeeintrag seitens der PV-Zellen **120** als Dampf aus dem Zwischenraum **221** in den zentralen Bereich des Arbeitsraums **225** gelangt und durch Dampfdurchtrittsöffnungen **223** zu der von den berippten Wärmeträgerrohren **212** gebildeten Wärmesenke **211** aufsteigt. In dem Zwischenraum **221** ist eine kapillare Struktur **224** für eine allseitige Benetzung der inneren Oberfläche des Zylinderrohrs **202** vorgesehen, sodass der Parabolrinnenkollektor **1** zur Sonne geneigt werden kann und damit sowohl für die in Fig. 4 als auch in Fig. 5 beschriebene Kollektoranordnung geeignet ist.

[0066] Fig. 22 zeigt einen perspektivisch dargestellten Längsabschnitt des Parabolrinnenkollektors **1** nach Fig. 21. Das Spiegelrohr **115** ist konzentrisch und koaxial zu dem Zylinderrohr **202**, das als Druckbehälter **21**

den Zweiphasen-Thermosyphon aufnimmt, angeordnet. Die einzelnen Spiegel **114** der sechs Spiegeleinheiten sind in ein Spiegelrohr **115** aus Glas integriert. Auf der Außenseite des Zylinderrohrs **202** bildet eine Vielzahl von in Reihe angeordneten PV-Zellen **120**, die von parallelen Sammelleitungen **205** mit Anode (-) und Kathode (+) flankiert werden, das Empfängererelement **12** des Parabolrinnenkollektors **1**. Ein Vakuum zwischen dem Zylinderrohr **202** und dem Spiegelrohr **115** dient der Vermeidung von Wärmeverlusten bei der Übertragung der an den PV-Zellen **120** absorbierten Wärme auf das in den berippten Wärmeträgerrohren **212** geführte Wärmeträgerfluid **23**.

Bezugszeichenübersicht

Parabolrinnenkollektor	1	Wärmeübertrager	2
Primäres Konzentratorelement	10	Absorberrohr	20
Brennlinie	f	Wärmebrücke	200
Verspiegelte Parabolrinne	100	Innenrippe	201
Kreissegmentspiegel	101	Zylinderrohr	202
Prismenfolie	102	Flachovalrohr	203
Sekundäres Konzentratorelement	11	Isolator	204
Brennlinien	f1–fn	Sammelleitung	205
Prismen	110	Reflektor	206
Prismenrinne	111	Kathode	(+)
Prismenrohr	112	Anode	(-)
Polygonrohr	113	Druckbehälter	21
Spiegel	114	Wärmequelle	210
Spiegelrohr	115	Wärmesenke	211
Empfängererelement	12	Beripptes Wärmeträgerrohr	212
PV-Zelle	120	Strömungsleiteinrichtung	22
Längsnut	121	Leitblech	220
Absorbierende Beschichtung	122	Zwischenraum	221
Drehachse	x	Dampfbremse	222
Paralleles Strahlenbündel	Sp	Dampfdurchtrittsöffnung	223
Radiale Strahlen	Sr	Kapillare Struktur	224
Konvergentes Strahlenbündel	Sk	Arbeitsraum	225
Einfallswinkel	α, α'	Wärmeträgerfluid	23
Brechungswinkel	β, β'	Transparentes Hüllrohr	24
Reflexionswinkel	γ	Unterdruck	\underline{U}
Ausfallswinkel	δ	Vakuum	\underline{V}
Überdruck	\underline{P}		

Patentansprüche

1. Parabolrinnenkollektor (**1**) bestehend aus einem primären Konzentratorelement (**10**) mit einer Brennlinie (f), einem sekundären Konzentratorelement (**11**) und einem Empfängererelement (**12**), welche Elemente (**10**, **11**, **12**) untereinander eine unverschiebliche Einheit bilden und welches sekundäre Konzentratorelement (**11**) bei einachsiger Nachführung des Parabolrinnenkollektors (**1**) um die Drehachse (x) zum jeweiligen Sonnenstand die tages- und jahreszeitlich in unterschiedlichen Winkeln einfallenden parallelen Strahlenbündel (Sp) der Sonne auf PV-Zellen (**120**) bündelt, wobei das sekundäre Konzentratorelement (**11**) konzentrisch zur Brennlinie (f) des primären Konzentratorelements (**10**) angeordnet ist und Prismen (**110**) aufweist, die die von dem primären Konzentratorelement (**10**) auf die Brennlinie (f) konzentrierten radialen Strahlen (Sr) in mindestens einem

konvergenten Strahlenbündel (Sk) auf eine Brennlinie (f1) oder in einer Vielzahl von konvergenten Strahlenbündeln (Sk) auf eine Vielzahl von mit einem radialen Abstand konzentrisch um die Brennlinie (f) angeordnete Brennlinien (f1–fn) fokussieren und die Brennlinien (f1–fn) auf der äußeren Mantelfläche eines Wärmeübertragers (2) liegen.

2. Parabolrinnenkollektor (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Wärmeübertrager (2) von einem Absorberrohr (20) gebildet wird, das auf seiner äußeren Mantelfläche eine absorbierende Beschichtung (122) trägt und an der inneren Mantelfläche des Absorberrohrs (20) Innenrippen (201) vorgesehen sind, die die absorbierte Wärme unmittelbar auf ein in dem Absorberrohr (20) zirkulierendes Wärmeträgerfluid (23) übertragen, wobei ein transparentes Hüllrohr (24) der Vermeidung von Wärmeverlusten dient und an den Zwischenraum zwischen dem Absorberrohr (20) und dem transparenten Hüllrohr (24) ein Vakuum (V) angelegt ist.

3. Parabolrinnenkollektor (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die von den PV-Zellen (120) absorbierte Wärme an der strahlungsabgewandten Seite der PV-Zellen (120) über Wärmebrücken (200) unmittelbar auf ein in dem Absorberrohr (20) geführtes Wärmeträgerfluid (23) übertragen wird.

4. Parabolrinnenkollektor (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die PV-Zellen (120) an parallel zu den Brennlinien (f1–fn) verlaufende Sammelleitungen (205) mit Anode (–) und Kathode (+) angeschlossen sind, wobei die Sammelleitungen (205) an ihren den PV-Zellen (120) zugekehrten Seiten einen Reflektor (206) aufweisen, der die Lichtstrahlen eines konvergenten Strahlenbündels (Sk), die die PV-Zellen (120) nicht direkt treffen, auf die PV-Zellen (120) reflektiert.

5. Parabolrinnenkollektor (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Wärmeübertrager (2) einen mit einem Unterdruck (U) beaufschlagten Druckbehälter (21) aufweist, der einen Arbeitsraum (225) umschließt, in dem ein phasenwechselndes Arbeitsmedium zwischen einer Wärmequelle (210) auf der strahlungsabgewandten Seite der PV-Zellen (120) und einer Wärmesenke (211) am oberen Ende des Arbeitsraums (225) die an den PV-Zellen (120) absorbierte Wärme in einem latenten Wärmeübergang auf ein Wärmeträgerfluid (23) überträgt, das in einer Vielzahl von berippten Wärmeträgerrohren (212) am oberen Ende des Arbeitsraums (225) zirkuliert und die Wärmesenke (211) des Zweiphasen-Thermosyphons bildet.

6. Parabolrinnenkollektor (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Wärmeübertrager (2) einen Zweiphasen-Thermosyphon mit einer Strömungsleiteneinrichtung (22) aufweist, die von einem Leitblech (220), einem Zwischenraum (221), einer Dampfbremse (222) und Dampfdurchtrittsöffnungen (223) gebildet wird, wobei das in seiner Flüssigphase von einem berippten Wärmeträgerrohr (212) abtropfende Arbeitsmedium über das Leitblech (220) in einen Zwischenraum (221) zwischen der inneren Mantelfläche des Druckbehälters (21) und der Dampfbremse (222) geleitet wird.

7. Parabolrinnenkollektor (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das primäre Konzentratorelement (10) entweder von einer verspiegelten Parabolrinne (100) oder von einem Kreissegmentspiegel (101) oder von einer einstrahlungsseitig vor dem Empfänger-element (12) angeordneten, durch einen Überdruck (P) pneumatisch gestützten Prismenfolie (102) gebildet wird oder dass das primäre Konzentratorelement (10) eine Kombination aus einer Prismenfolie (102) und einer verspiegelten Parabolrinne (100) aufweist.

8. Parabolrinnenkollektor (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Prismen (110) eines sekundären Konzentratorelements (11) eine Anordnung von mindestens zwei Dreiecksprismen, die die radialen Strahlen (Sr) auf eine Brennlinie (f1) fokussieren oder eine Anordnung von mehreren untereinander verbundenen Prismen (110), die eine einstrahlungsseitig offene Prismenrinne (111) oder ein geschlossenes Prismenrohr (112) oder ein geschlossenes Polygonrohr (113) bilden, das als sekundäres Konzentratorelement (11) die radialen Strahlen (Sr) auf eine Vielzahl von Brennlinien (f1–fn) an der Oberfläche eines Wärmeübertragers (2) fokussiert, wobei die Seiten eines Prismas (110) als planebene Flächen oder als einachsig gekrümmte Flächen ausgebildet sind.

Es folgen 18 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

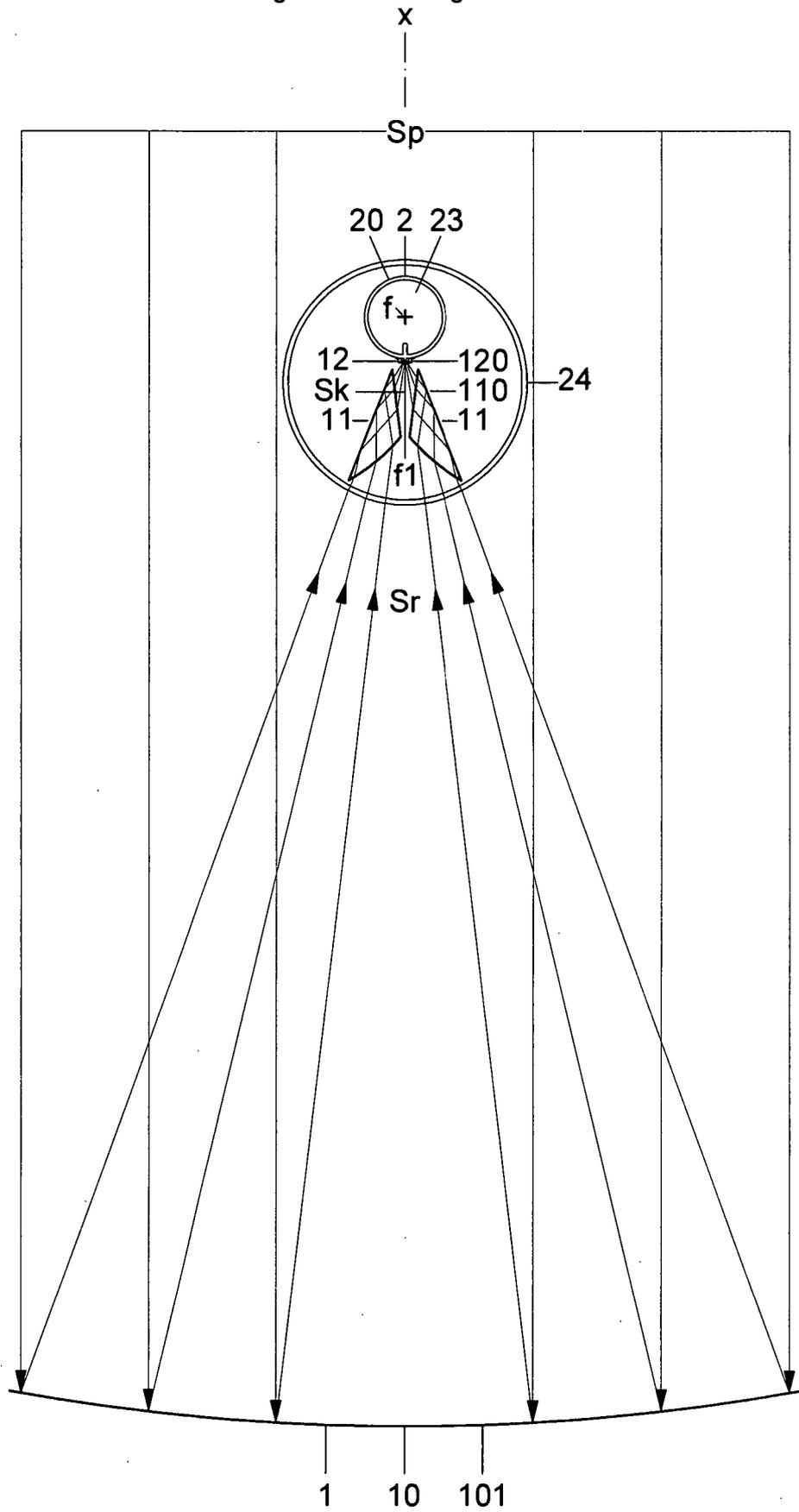


Fig.1

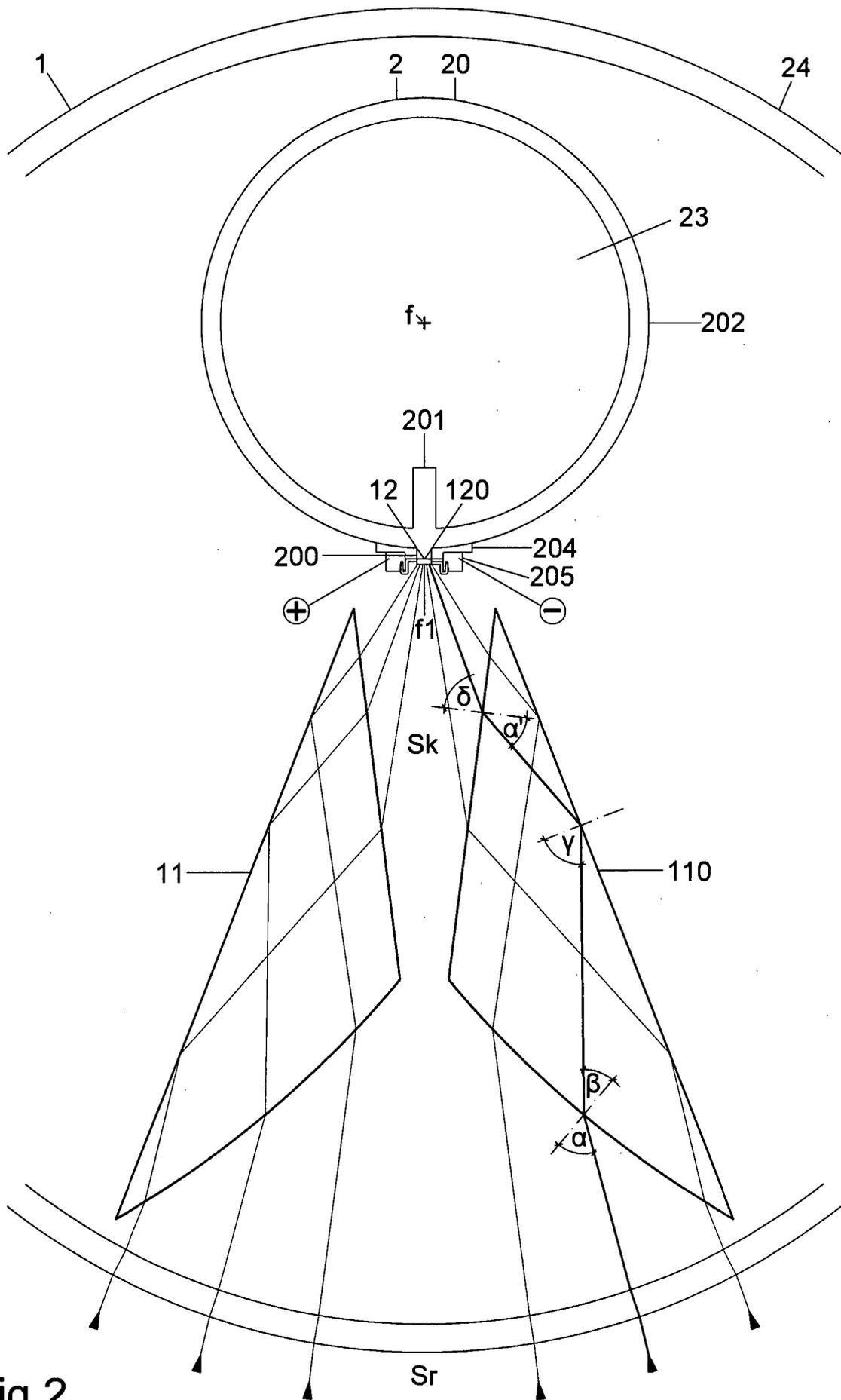


Fig.2

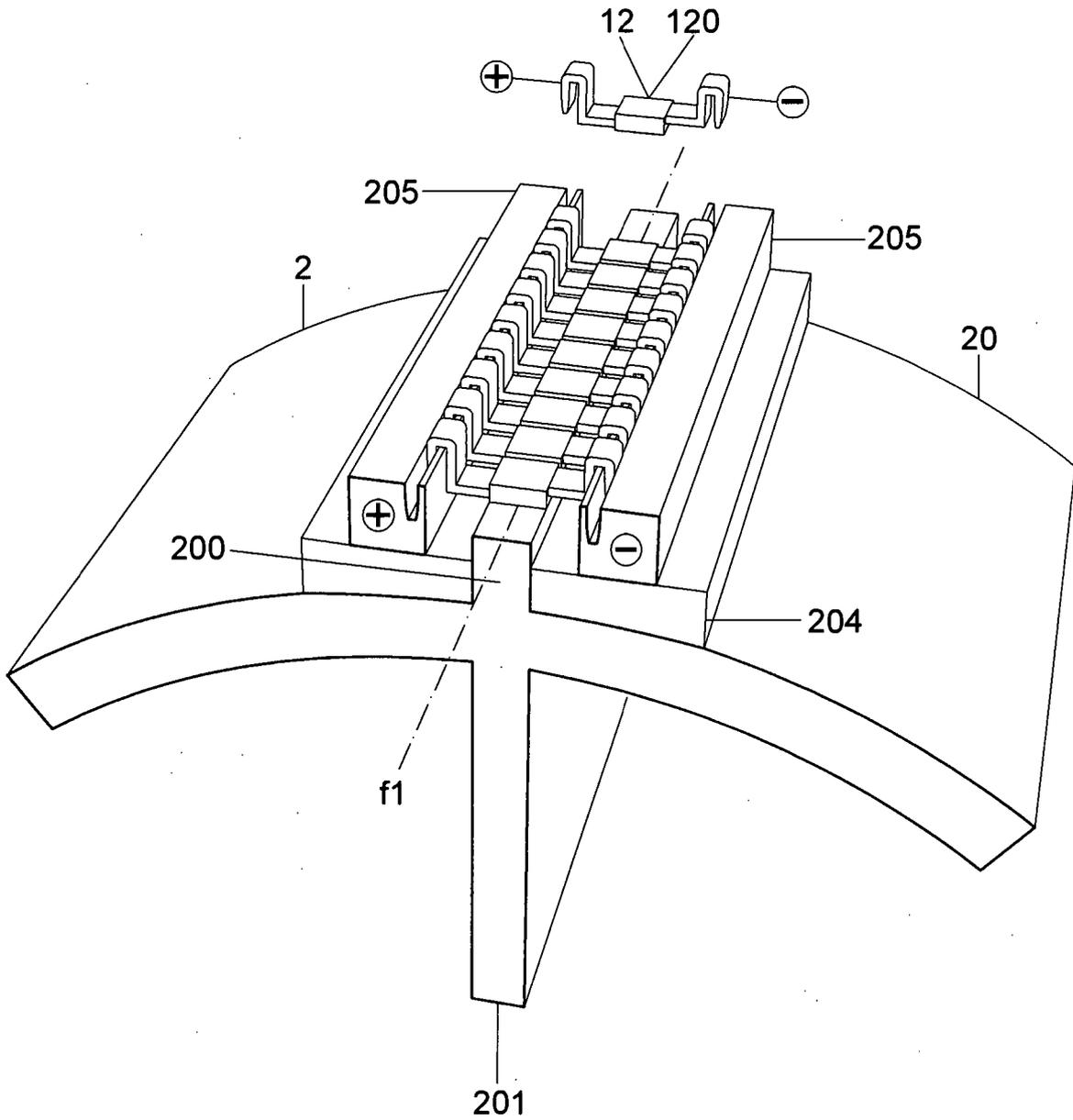


Fig.3

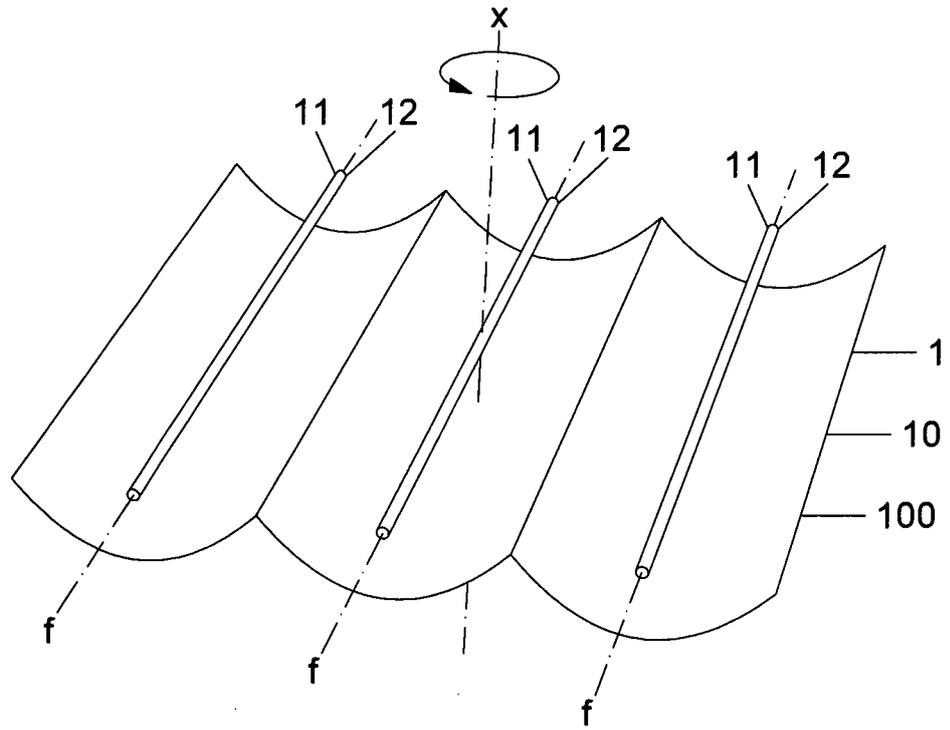


Fig.4

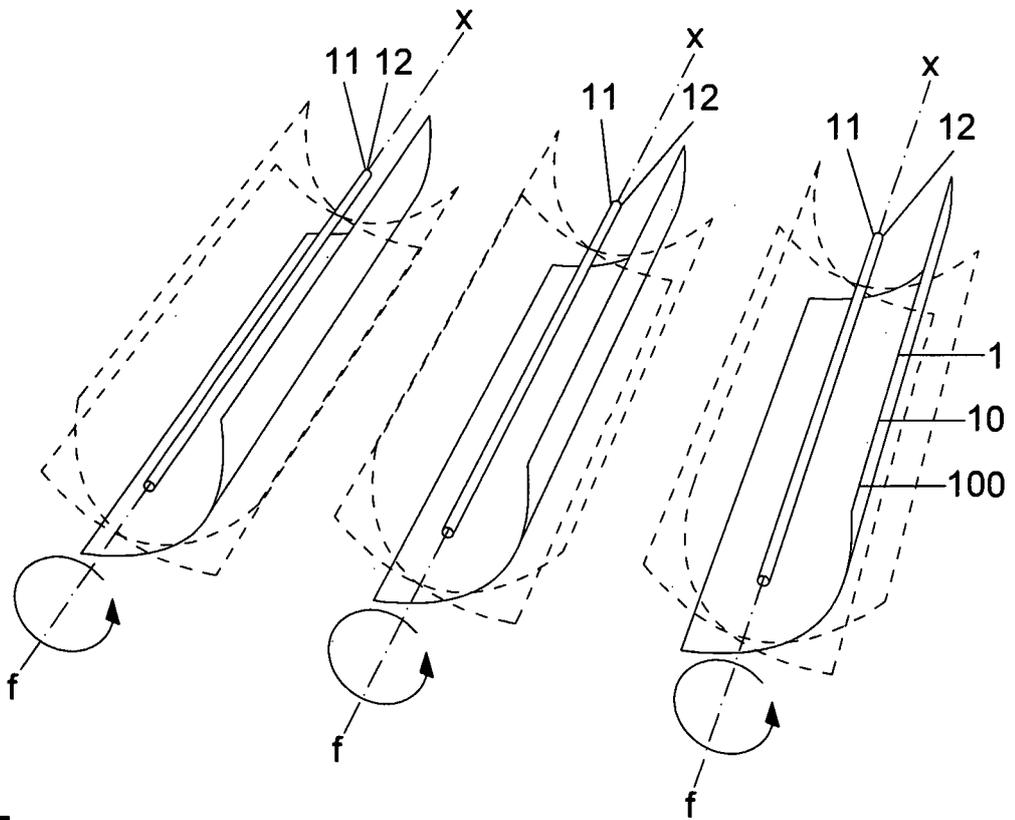


Fig.5

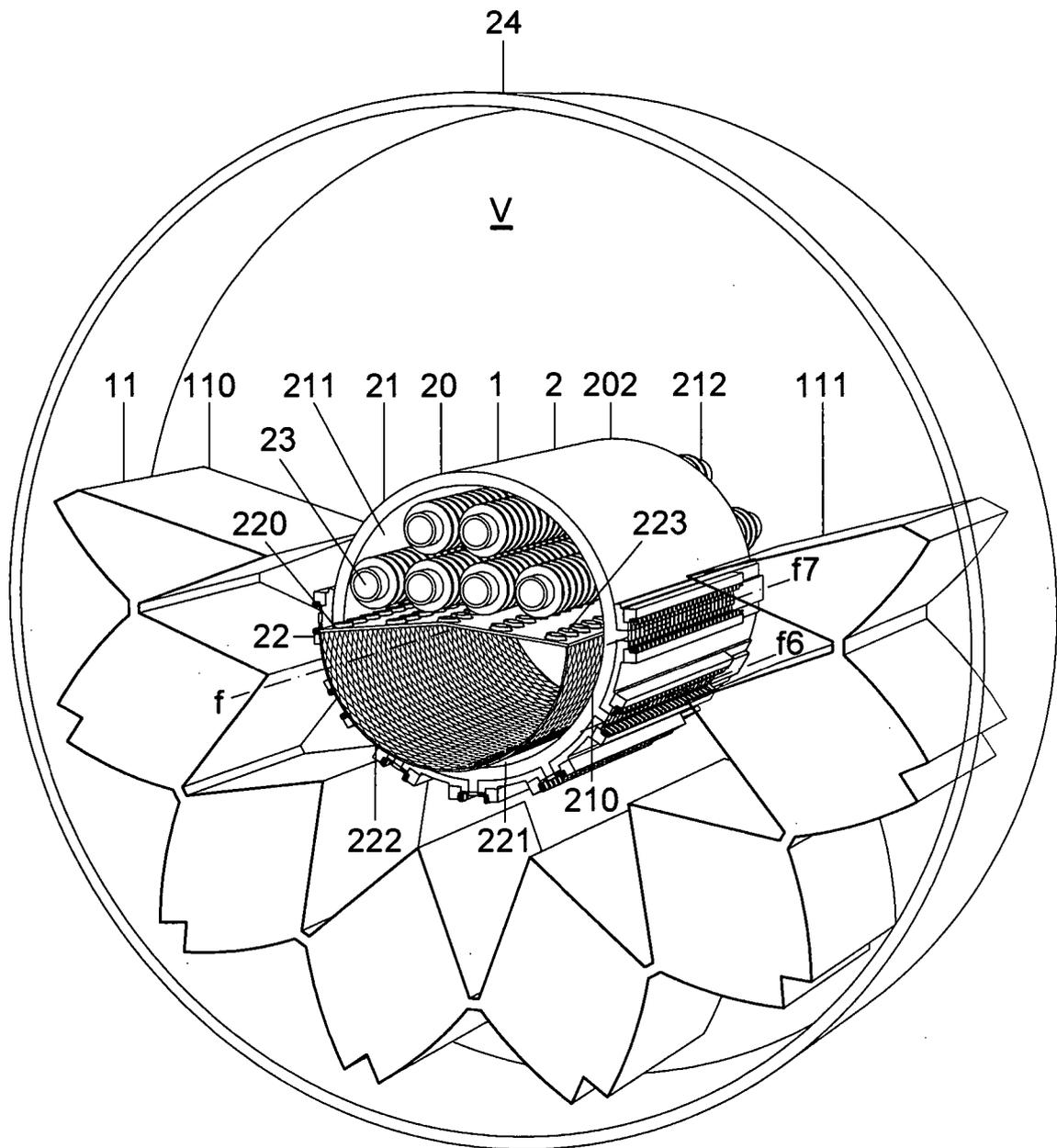
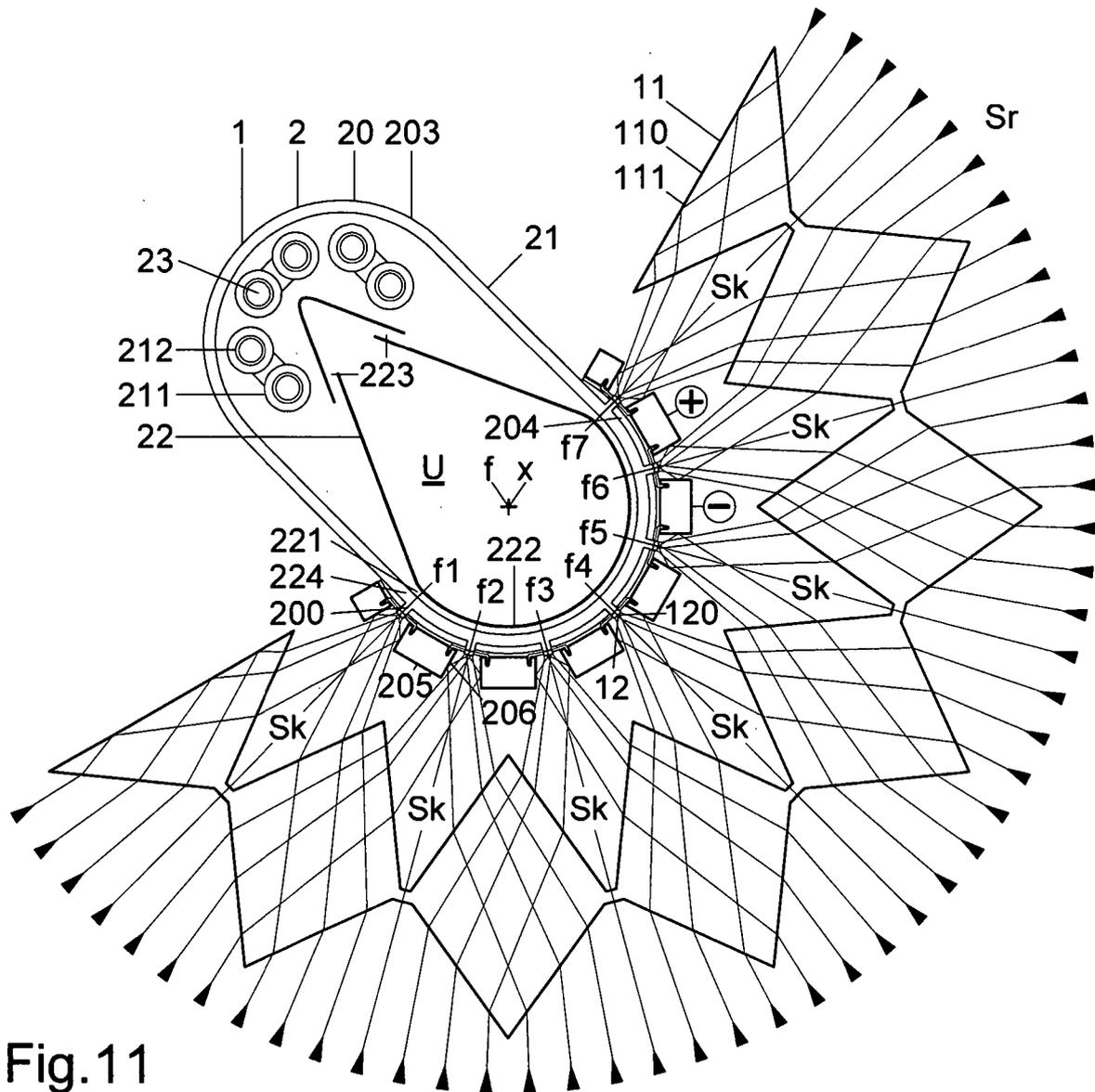
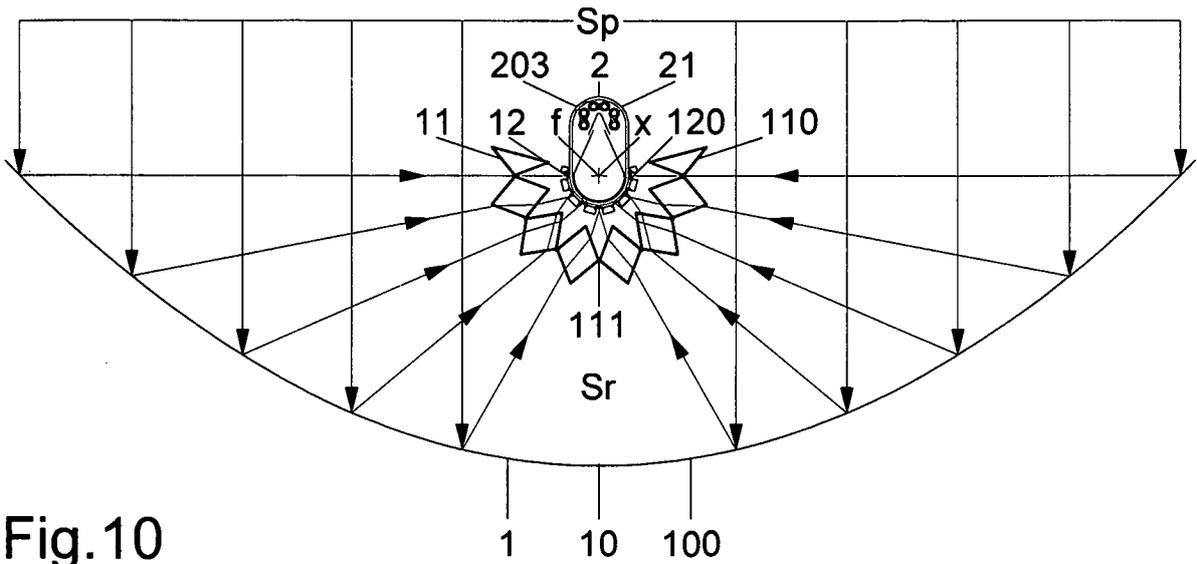


Fig.9



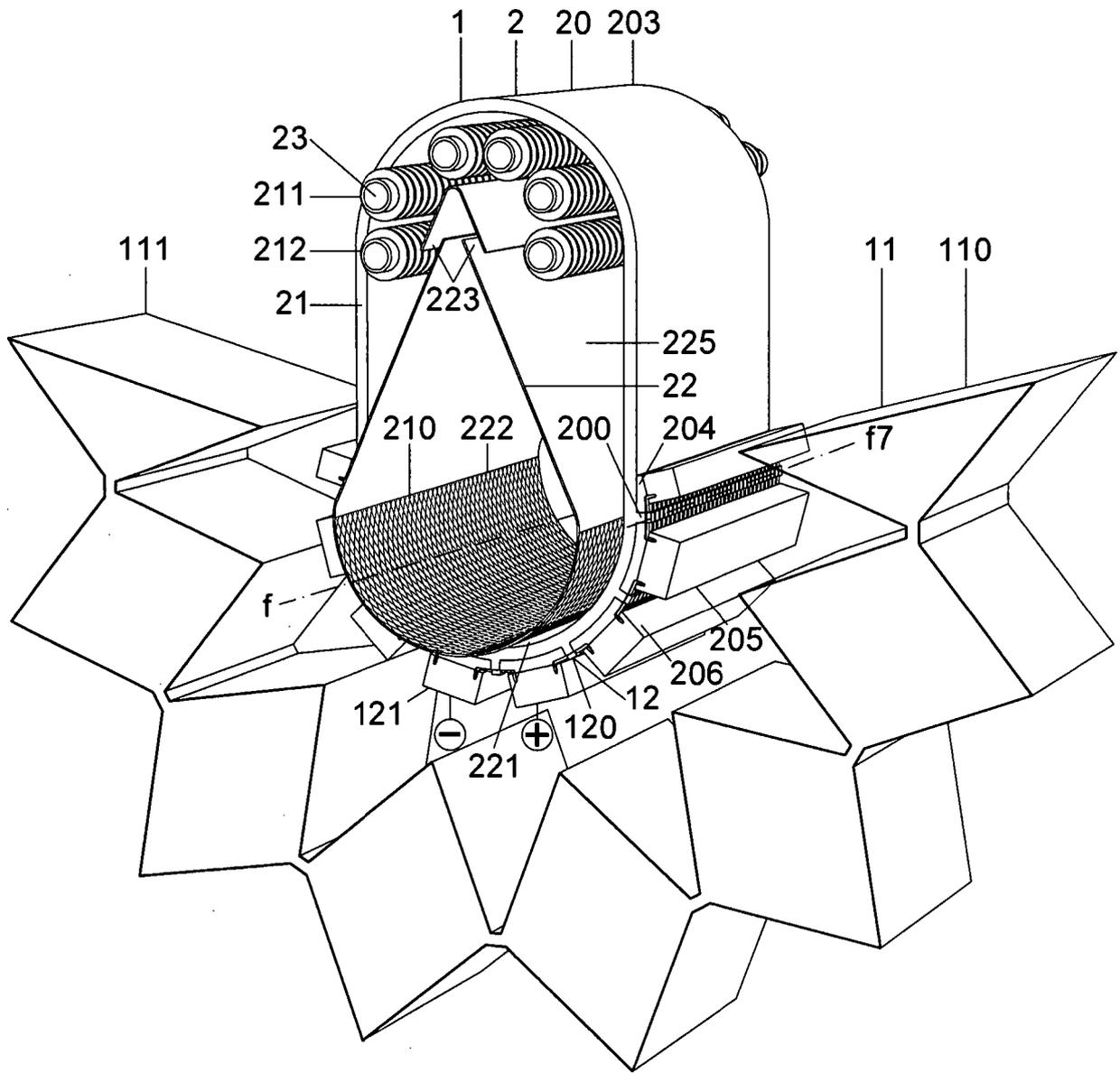


Fig.12

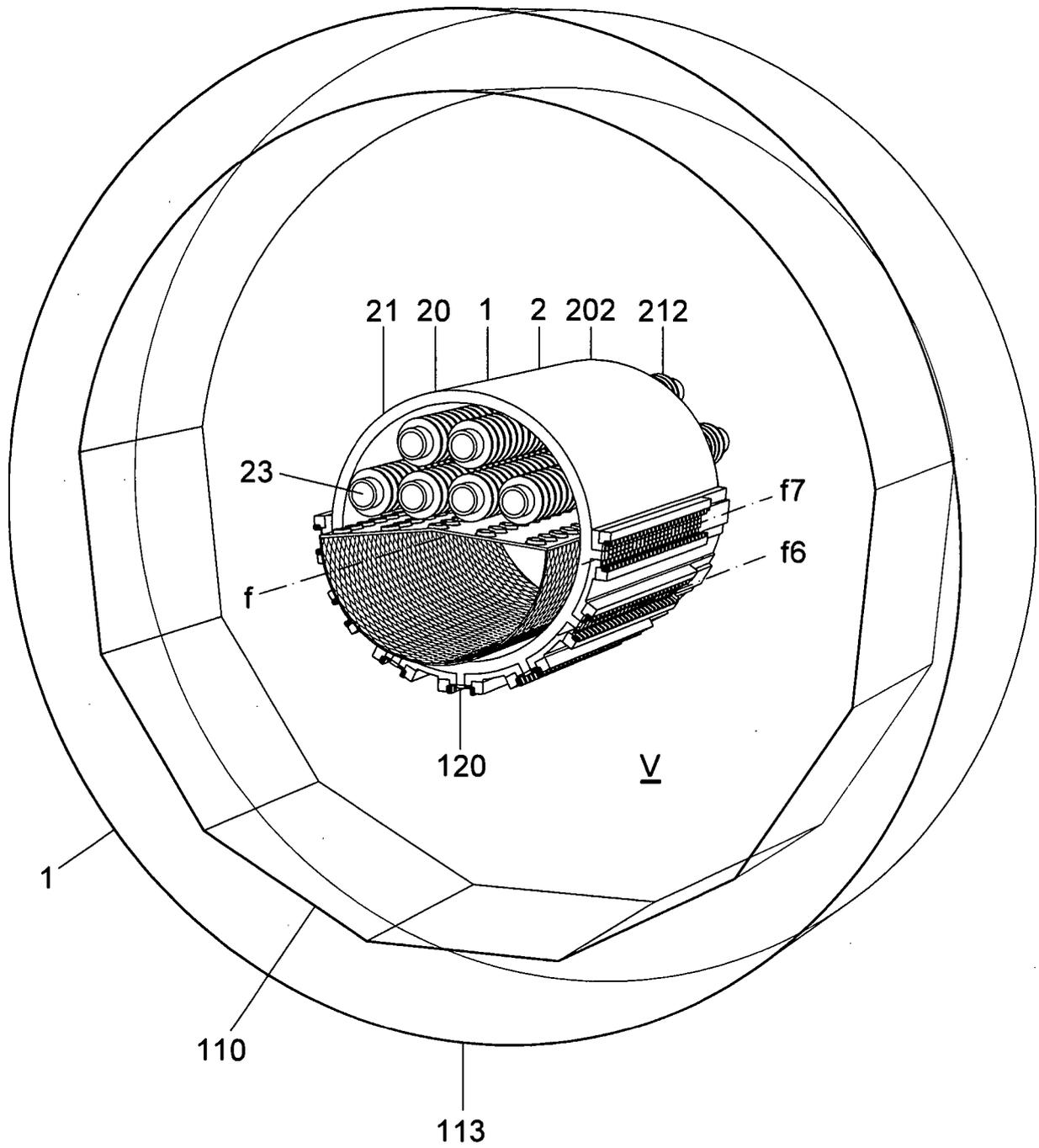


Fig. 14

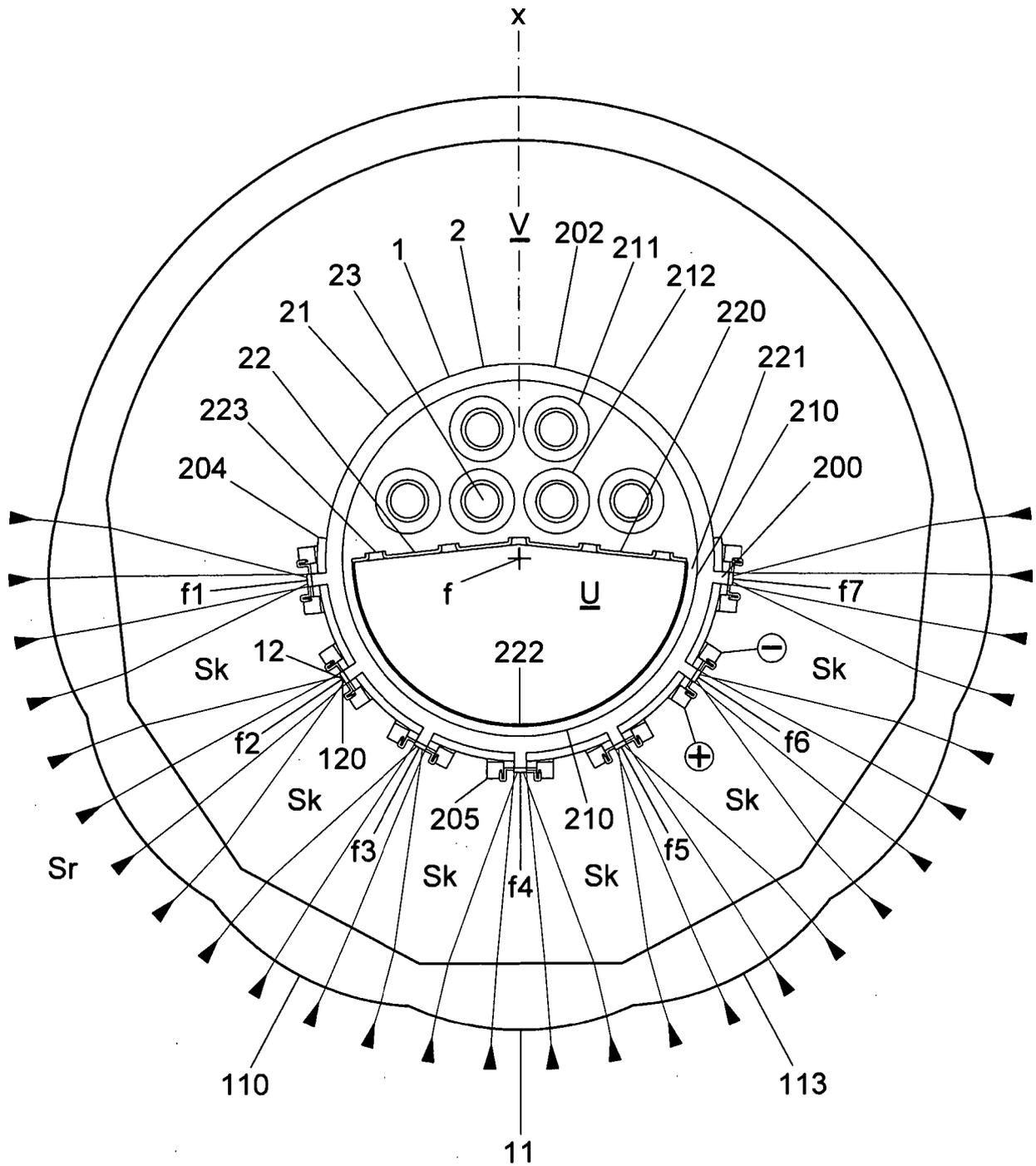


Fig.15

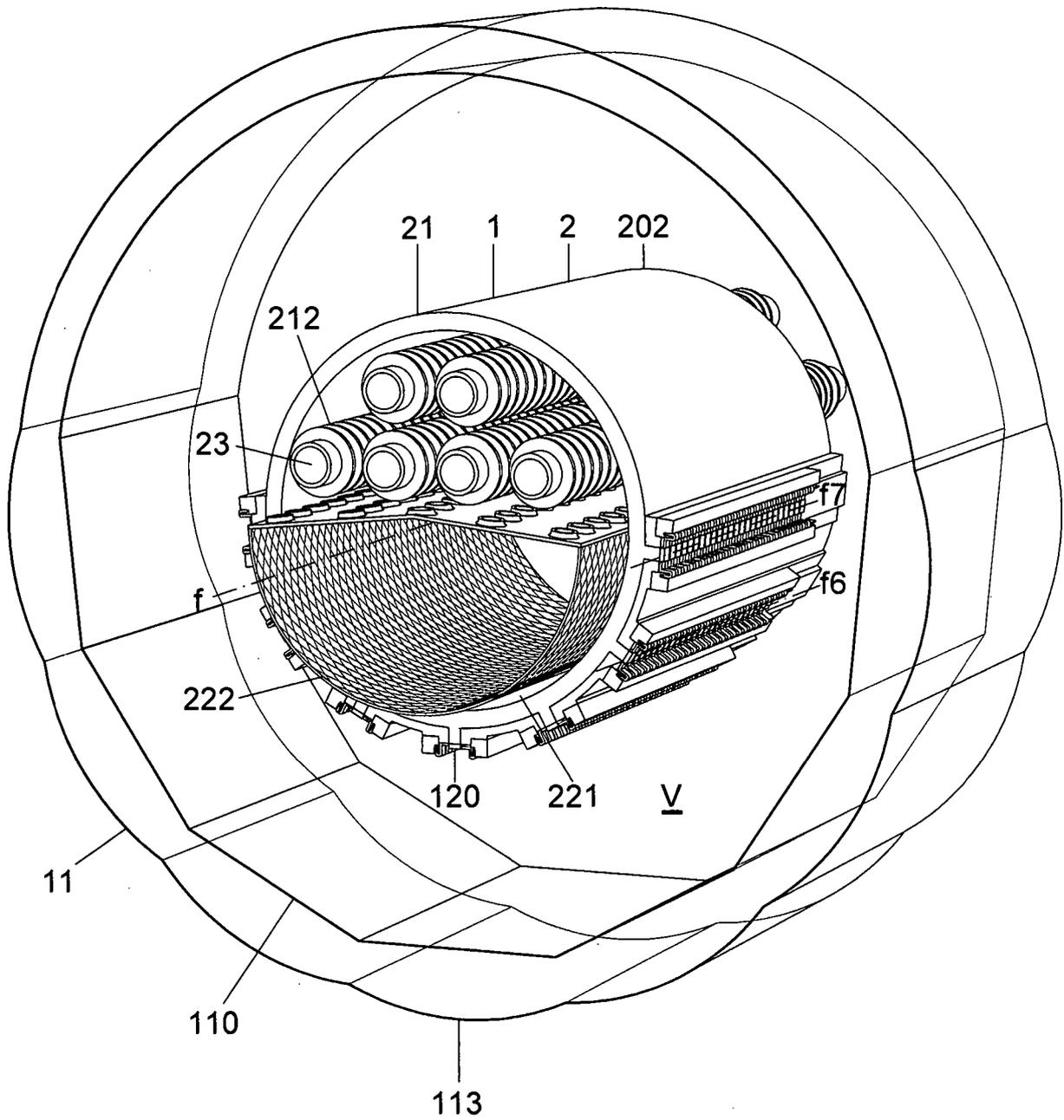


Fig.16

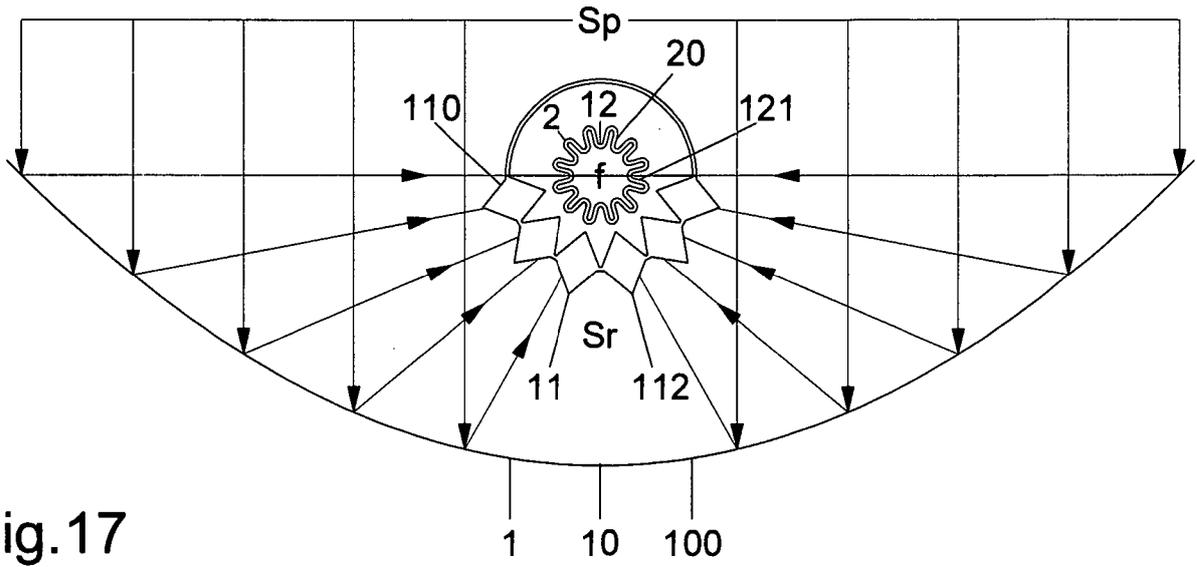


Fig.17

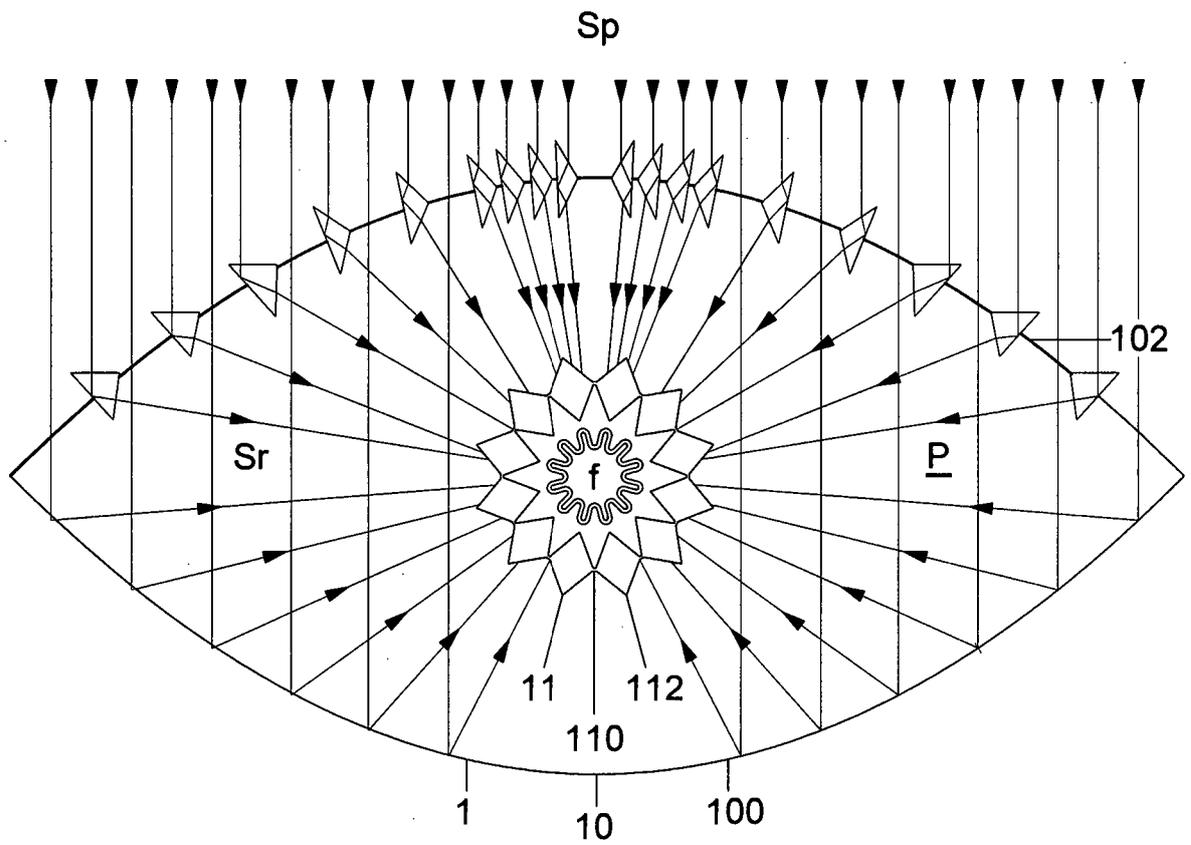


Fig.18

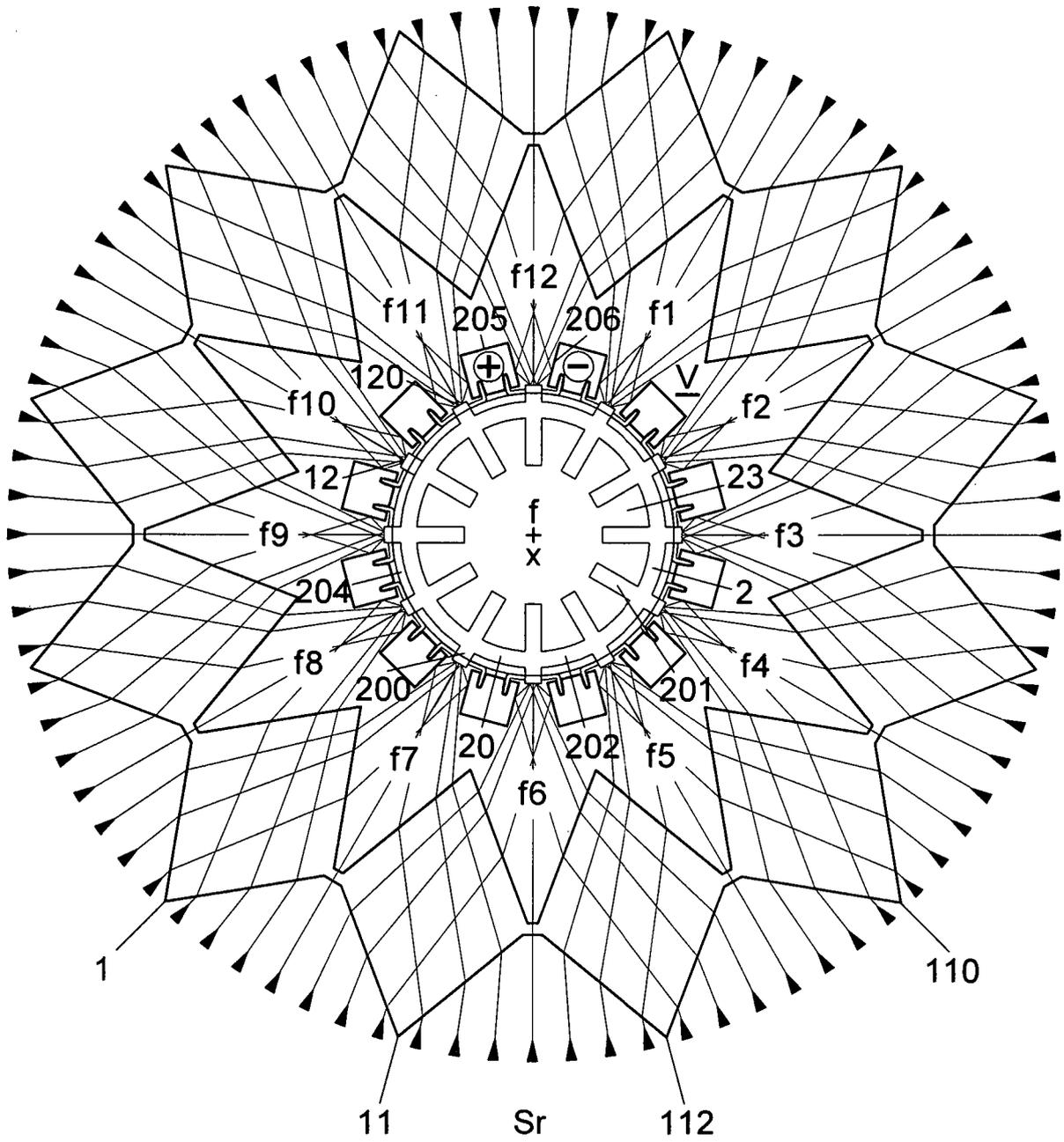


Fig.20

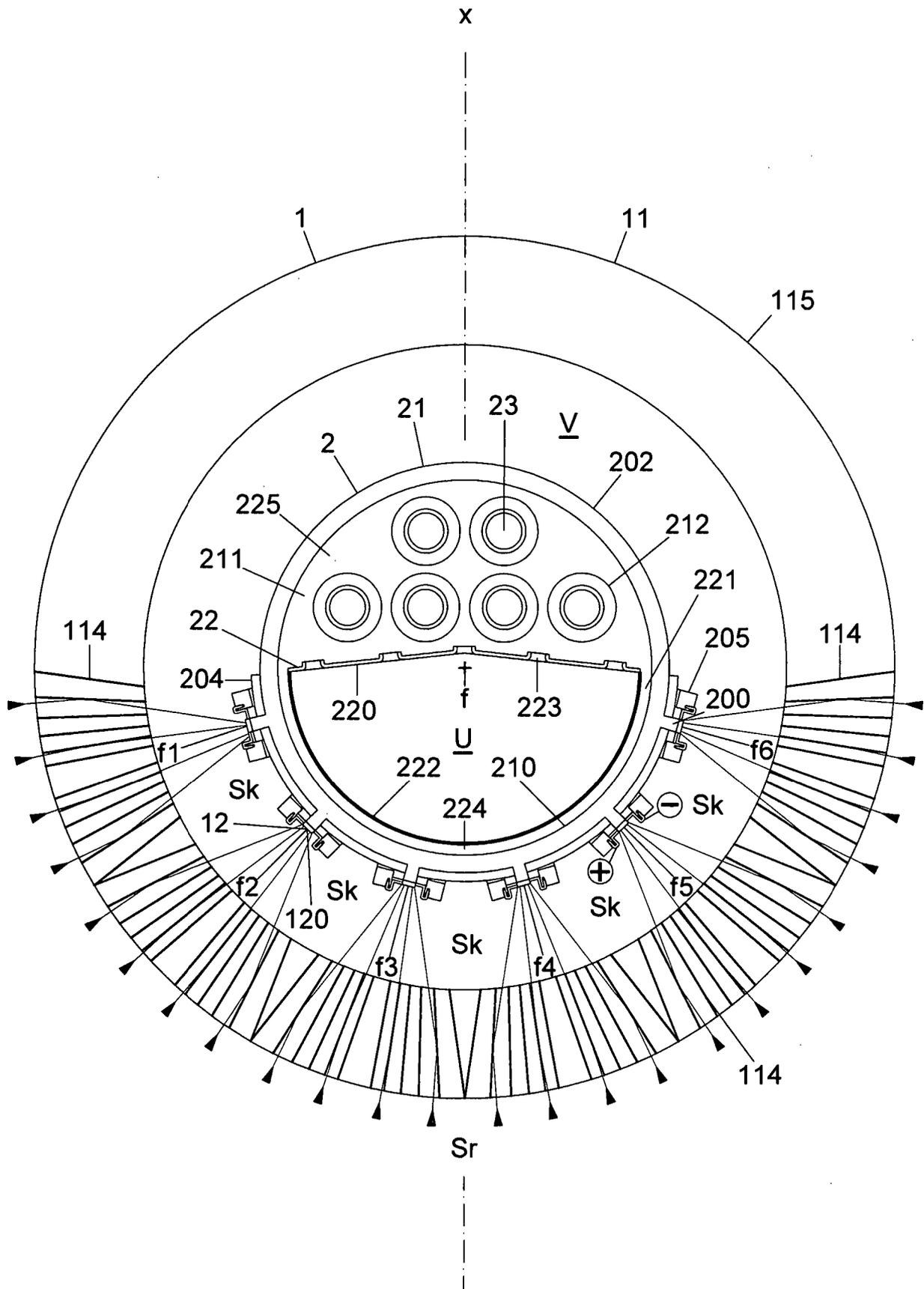


Fig.21

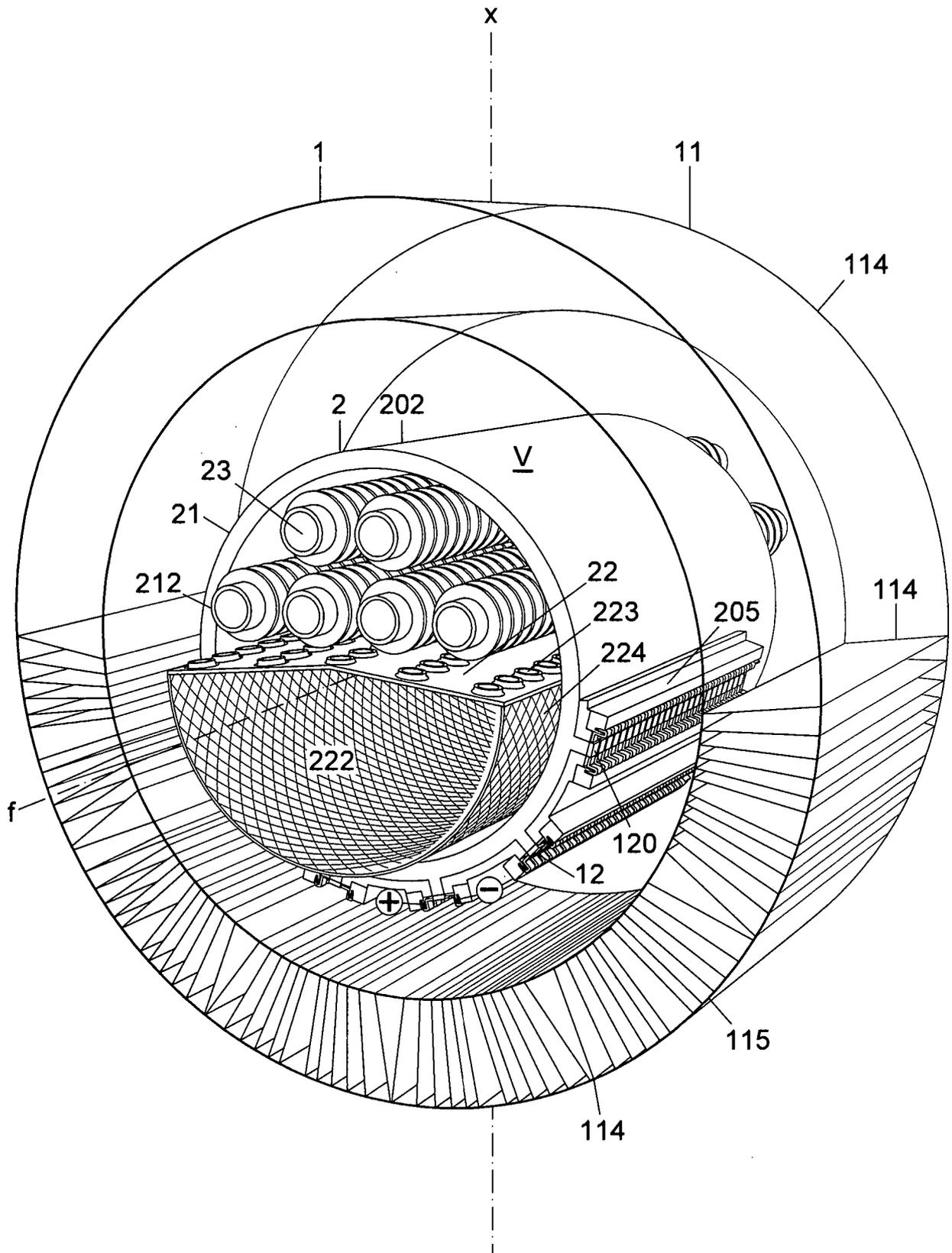


Fig.22