



(11)

EP 3 551 947 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:

14.09.2022 Patentblatt 2022/37

(21) Anmeldenummer: **17832047.9**

(22) Anmeldetag: **06.12.2017**

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):

F25B 9/14 ^(2006.01)

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):

F25B 9/14; F25B 9/145; F25B 2309/003; F25B 2309/1408; F25B 2309/1415

(86) Internationale Anmeldenummer:

PCT/EP2017/081750

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:

WO 2018/104410 (14.06.2018 Gazette 2018/24)

(54) **REGENERATOR FÜR KRYO-KÜHLER MIT HELIUM ALS ARBEITSGAS, EIN VERFAHREN ZUM HERSTELLEN EINES SOLCHEN REGENERATORS SOWIE EINEN KRYO-KÜHLER MIT EINEM SOLCHEN REGENERATOR**

REGENERATOR FOR A CRYO-COOLER WITH HELIUM AS A WORKING GAS, A METHOD FOR PRODUCING SUCH A REGENERATOR, AND A CRYO-COOLER COMPRISING SUCH A REGENERATOR

RÉGÉNÉRATEUR POUR REFROIDISSEUR CRYOGÉNIQUE COMPRENANT DE L'HÉLIUM EN TANT QUE GAZ DE TRAVAIL, PROCÉDÉ PERMETTANT DE PRODUIRE UN TEL RÉGÉNÉRATEUR AINSI QUE REFROIDISSEUR CRYOGÉNIQUE COMPRENANT UN TEL RÉGÉNÉRATEUR

(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

(30) Priorität: **08.12.2016 DE 202016106860 U**

03.03.2017 DE 102017203506

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:

16.10.2019 Patentblatt 2019/42

(73) Patentinhaber: **Pressure Wave Systems GmbH**

82024 Taufkirchen (DE)

(72) Erfinder: **HÖHNE, Jens, Dr.**

80337 München (DE)

(74) Vertreter: **Winter, Brandl - Partnerschaft mbB**

Alois-Steinecker-Straße 22

85354 Freising (DE)

(56) Entgegenhaltungen:

CN-A- 104 197 591 DE-A1- 19 924 184

JP-A- H07 318 181 JP-A- S62 233 688

JP-A- 2011 190 953 US-A- 6 131 644

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).

EP 3 551 947 B1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Regenerator für Kryo-Kühler mit Helium als Arbeitsgas gemäß Anspruch 1, ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Regenerators nach Anspruch 13 und 14 sowie einen mit einem solchen Regenerator versehenen KryoKühler nach Anspruch 15.

[0002] Periodisch betriebene Kryo-Kühler, wie z. B. Stirling-, Gifford-McMahon- und Pulsrohr-Kühler werden regenerativ betrieben. D. h. man nutzt die Wärmekapazität eines Materials aus, um die Kälte zu speichern bzw. um warmes Gas beim Eintritt in die Expansionskammer vor zu kühlen. Ein Problem hierbei ist, dass bei Temperaturen im Bereich 2K bis 20K die Wärmekapazität fast aller Materialien stark abnimmt. Damit ist es sehr schwer, Materialien zu finden, die im Bereich zwischen 2K und 20K eine ausreichend hohe Wärmekapazität aufweisen. Fig. 12 zeigt den typischen Aufbau eines zweistufigen Pulsrohrkühlers mit einer ersten Kaltstufe 20 bis ca. 30K und einer zweiten Kaltstufe 22 bis ca. 2K. Die erste Kaltstufe 220 umfasst ein erstes Pulsrohr 224 einen ersten Regenerator 226. Die zweite Kaltstufe 222 umfasst ein zweites Pulsrohr 228 und einen zweiten Regenerator 230 gemäß der vorliegenden Erfindung. Mit der ersten Kaltstufe 220 werden ca. 30K und mit der zweiten Kaltstufe 222 werden ca. 4K erreicht. Das erste Pulsrohr 224, der erste Regenerator 226 und das zweite Pulsrohr 228 enden in einem Verbindungsmittel 232, der die Umgebung von dem zu kühlenden Bereich trennt. Über Arbeitsgasleitungen 234 wird von einer nicht dargestellten Pumpe pulsierend Arbeitsgas zu- und abgeführt. Die Arbeitsgasleitungen 234 münden in den ersten Regenerator 226 und über Ventile 236 besteht eine Verbindung mit dem ersten Pulsrohr 224 und dem zweiten Pulsrohr 228 sowie mit Balastvolumen 238. Der zweite Regenerator 230 in der zweiten Kaltstufe 222 besteht aus einem ersten Regeneratorabschnitt 240 und aus einem Tieftemperatur-Regeneratorabschnitt 242. Der erste Regeneratorabschnitt 240 besteht aus übereinanderliegenden Metallsieben 244 - siehe Fig. 13. Der Tieftemperatur-Regeneratorabschnitt 242 enthält seltene Erdverbindungen, z. B. ErNi, HoCu₂ und dergleichen. Der Aufbau des zweiten Regenerators 230 ist schematisch in Fig. 11 dargestellt. Seltene Erdverbindungen sind relativ teuer. Weiterhin werden diese Materialien in Form von Kügelchen 46 (100 bis mehrere 100 Mikrometer Durchmesser) eingesetzt. Ein Problem hierbei ist die Fixierung der Kugeln im oszillierenden Fluss des Arbeitsgases, da jede Art von Bewegung zum Abrieb und damit Staub führt, welche die Lebensdauer der Kryo-Kühler drastisch reduziert. Darüber hinaus bedingen Kugelschüttungen gemäß Fig. 13 ein erhebliches Totvolumen, das nicht zum Wärmetausch und auch nicht zur Kühlleistung beiträgt.

[0003] Helium wird häufig als Arbeitsgas bei Kryo-Kühler eingesetzt. Helium besitzt in dem Temperaturbereich von 2K bis 20K eine vergleichsweise hohe Wärmekapazität, die der Wärmekapazität von seltenen Erdverbindungen

in diesem Temperaturbereich gleich kommt. Daher ist vorgeschlagen worden Helium als Regenerator-Material einzusetzen. Aus der US 2012/0304668 A1, der, DE 10319510 A1, der DE 102005007627 A1, CN 104197591 A, DE 19924184 A1 und der US 4359872 A sind mit Helium gefüllte geschlossene Hohlkörper aus Glas oder Metall als Regeneratorstrukturen bekannt. Diese Grundidee hat bis jetzt zu keinem fertigen Produkt geführt. Darüber hinaus führen mit Helium gefüllte Kügelchen wieder zu Abrieb, was die Einsatzdauer des Kryo-Kühlers verringert. Das Grundproblem dieser bekannten geschlossenen Hohlkörper mit Helium besteht in der aufwendigen Befüllung der Hohlkörper mit Helium unter Überdruck. Aufgrund des Überdrucks muss die Wandstärke der Hohlkörper erhöht werden, was zu einer Verschlechterung der Wärmeübergangswiderstände führt.

[0004] In dem Artikel "Heat Capacity Characterization of a 4K Regenerator with Non-Rare Earth Material" in Cryocoolers 19, International Cryocooler Conference, Inc., Boulder, CO, 2016 wird eine Struktur mit Adsorbentmaterial, das Helium absorbieren kann, als Regenerator für Kryo-Kühler vorgeschlagen. Der Aufbau des Regenerators ist kompliziert und aufwendig und es besteht die Gefahr, dass Teile des Adsorbentmaterials durch den Arbeitsgasstrom mitgerissen werden. Durch die mitgerissenen Adsorbentpartikel würde die Lebensdauer eines Kryo-Kühlers mit einem solchen Regenerator drastisch reduziert.

[0005] Es ist daher Aufgabe der vorliegenden Erfindung einen im Vergleich zu Regeneratoren mit seltenen Erdverbindungen kostengünstigen Regenerator anzugeben, der Helium als Wärmespeichermaterial nutzt und dennoch einen einfachen Aufbau aufweist.

[0006] Die Lösung dieser Aufgabe erfolgt durch die Merkmale des Anspruch 1.

[0007] Der Regenerator besteht im einfachsten Fall aus einer hohlen Zelle mit Wärme leitenden Zellwänden. Die Außenseite der Zellwände begrenzt wenigstens zum Teil einen Strömungskanal für das Arbeitsgas Helium. Der Hohlraum ist mit Helium als Wärmespeichermaterial gefüllt und ist über eine Druckausgleichsöffnung mit Außenseite der Zelle verbunden. Das Arbeitsgas Helium, umströmt die dosenförmige Zelle, wodurch über die Zellwände ein Wärmeübergang zwischen dem Arbeitsgas Helium außerhalb des Hohlraums und dem Helium innerhalb des Hohlraums stattfindet. Die Größe der Zelle(n) in Relation zu der Größe des Strömungskanals des Arbeitsgases ist so gewählt, dass sich zwischen der Hochdruckseite und der Niederdruckseite des Regenerators die gewünschten Druckdifferenzen bei einem möglichst geringen Totvolumen einstellen. Die Zellwände der Zelle weisen eine sehr geringe Wandstärke auf, sodass der gewünschte Wärmeaustausch erfolgen kann. Das Verhältnis von Volumen des oder der Hohlräume zu Öffnungsfläche bzw. Ausströmwiderstand der Druckausgleichsöffnung ist so gewählt, dass sich der Druck im Hohlraum oder in den Hohlräumen im Arbeits-

frequenzbereich des Kühlerbetriebs (ca. 1 bis 60 Hz) kaum oder zumindest nur wenig ändert. Diese Funktionsweise ist vergleichbar mit einem Kondensator bei hohen Frequenzen - dieser bekommt von der Änderung der Spannung quasi nichts mit, wenn die Kapazität hoch genug ist und die Spannungsänderung gering. Im typischen Anwendungsfall würde der Druck in der Zelle immer um den Mitteldruck des Kühlsystems, typischer Weise ca. 16 bar, schwanken. Der stabile Druck ist deshalb wichtig, da ansonsten das Volumen des oder der Hohlräume einen großen Beitrag zum "Totvolumen" wäre, wenn dessen Druck bei jeder Periode zwischen z. B. 8 und 24 bar schwanken würde, ohne dass es zur Kühlung beiträgt. Die Öffnungsfläche bzw. der Ausströmwiderstand der Druckausgleichsöffnung ist so gewählt, dass vor Inbetriebnahme des Regenerators und während der Anlaufphase aufgrund der herrschenden Druckverhältnisse Helium in den oder die Hohlräume eindringt. Durch den hohen Ausströmwiderstand der Druckausgleichsöffnung ergibt sich der vorstehend erläuterte "Kondensator-Effekt" während der Druckschwankungen im Bereich des Regenerators mit der Arbeitsfrequenz eines Kühlers. In der Anlaufphase sinkt die Temperatur des Arbeitsgases Helium und auch des Heliums in den Regeneratorhohlräumen. Folglich verringert sich das Volumen des Heliums und über die Druckausgleichsöffnung strömt weiter Helium in die Regeneratorhohlräume nach. D. h. während der Anlaufphase muss Helium nachgefüllt werden, bis sich die Arbeitstemperaturen und -drücke eingestellt haben. Ohne Druckausgleichsöffnung müssten die Hohlräume in der Zelle vorab mit Helium befüllt werden, was aufgrund der Drücke im Bereich von 16 bar im Arbeitsbereich des Kryo-Kühlers erheblich dickere Zellwände bedingen würde. Werden die Hohlkörper bei Umgebungstemperatur mit Helium befüllt, müssen aufgrund der geringeren Dichte von Helium bei Umgebungstemperatur noch wesentlich höhere Drücke für die Befüllung gewählt werden. Dies führt zu dickeren Zellwänden mit erheblich höheren Wärmedurchgangswiderstand. Durch die dickeren Zellwände würde einen Wärmedurchgangswiderstand der Zellwände so hoch, dass im Arbeitsfrequenzbereich von Kryo-Kühlern kaum mehr zu einem Wärmeaustausch zwischen dem Arbeitsgas Helium und dem Helium im Inneren des oder der Hohlräume kommen würde. Dies dürfte auch der Grund sein, dass kein Kryo-Kühler auf dem Markt ist, der einen Regenerator mit Helium in geschlossenen Hohlräumen einsetzt. Die Druckausgleichsöffnung hat erfindungsgemäß die Form einer Kapillare.

[0008] Die Zelle wird von Strömungskanälen durchsetzt, die von Zellwänden begrenzt sind. Hierdurch ergibt sich eine vergrößerte Wärmeaustauschfläche und somit ein verbesserter Wärmübergang zwischen dem Helium in den Hohlräumen und dem Arbeitsgas außen. Die Strömungskanäle sind vorzugsweise als Schlitze ausgebildet. Die Schlitze enden vor dem Rand der Zelle, sodass die Zelle nicht auseinanderfallen kann. Die Strömungskanäle sind als eine Mehrzahl von Schlitzen ausgebildet,

die geradlinig und parallel zueinander verlaufen und vor dem Rand der Zelle enden, sodass die Zelle nicht auseinanderfallen kann. Ein umlaufender Kanal ist an dem Rand der Zelle ausgebildet, in den die mehrere miteinander verbundenen Hohlräume münden.

[0009] Die schlitzförmigen Strömungskanäle für Arbeitsgas verlaufen vorzugsweise geradlinig und parallel zueinander, um zum einen den Strömungswiderstand zu minimieren und zum anderen, um die rohrförmigen Hohlräume zwischen den gleichförmig zu gestalten. Durch die Geradlinigkeit und die Parallelität ergibt sich auf einfache Weise zwischen zwei Strömungskanälen ein gleicher Abstand.

[0010] Durch die runde Außenform des Regenerators lassen sie sich auf einfache Weise in die üblicherweise runden Querschnitte der Kryokühler einfügen. Dabei kann eine einzige Zelle, gegebenenfalls mit mehreren rohrförmigen Strukturen, die Form einer Scheibe haben. Alternativ können mehrere Zellen zu einer Scheibenform zusammengefügt werden. - Anspruch 2.

[0011] Durch die Hintereinanderanordnung nach Anspruch 3 erhöht sich die Wärmespeicherkapazität des Regenerators.

[0012] Durch eine thermische Isolierung zwischen in Strömungsrichtung des Arbeitsgases hintereinander angeordneten Zellen - Anspruch 4 - wird verhindert, dass zwischen den Hohlräumen in Strömungsrichtung des Arbeitsgases Wärme ausgetauscht wird. Ein solcher Wärmeaustausch in Strömungsrichtung des Arbeitsgases würde einen Kurzschluss des Regenerators bedeuten; ein Wärmeaustausch in Strömungsrichtung des Arbeitsgases trägt nicht zur Funktion des Regenerators bei. Die Dicke der thermisch isolierenden Schicht beträgt vorzugsweise zwischen 0,1mm und 0,5mm.

[0013] Durch die Ausrichtelemente nach Anspruch 5 bis 7 wird die fluchtende Ausrichtung der Strömungskanäle aufeinander liegender Zellen vereinfacht. Die Ausrichtelemente sind z. B. Ausrichtzapfen, die eine konische oder pyramidenförmige Spitze aufweisen.

[0014] Die Form einer Kapillare bedeutet, dass die Querschnittsfläche der Öffnung im Vergleich zur Oberfläche des Hohlkörpers sehr klein ist.

[0015] Die Druckausgleichsöffnung kann auch durch Undichtigkeiten bereitgestellt sein, die bei der Herstellung der Zellen auftreten - Anspruch 8.

[0016] Die Größe und damit die Durchlässigkeit der Druckausgleichsöffnung werden so gewählt, dass während eines Arbeitszyklus des Regenerators die Druckänderung in der Zelle maximal 20% und vorzugsweise maximal 10% beträgt. Es handelt sich hier um einen Optimierungsprozess. Je größer die Kapillare, desto größer ist der unerwünschte Stoffaustausch, desto größer sind die Druckschwankungen im Hohlraum der Zelle und umso schneller erfolgt das Eindringen des Heliums in die Hohlräume bei Inbetriebnahme des Regenerators. Je kleiner die Kapillare desto weniger Kompressionsarbeit muss verrichtet werden, aber desto länger dauert das Eindringen des Heliums in die Hohlräume bei Inbetrieb-

nahme des Regenerators..

[0017] Um den Wärmeaustausch zwischen dem Arbeitsgas Helium und dem in dem Hohlkörper befindlichen, Wärme speichernden Helium zu verbessern, sind die Oberflächen der Hohlkörper mit Verwirbelungsstrukturen versehen - Anspruch 9

[0018] Die Querschnittsformen der rohrförmigen Hohlräume nach Anspruch 10 ermöglichen die Herstellung des Regenerators mittels 3D-Druck (Anspruch 14). Die Quaderoder Rechteckform der Querschnitte der Hohlräume ist für den Wärmeaustausch optimal. Zellen mit rohrförmigen Hohlräumen mit wenigstens einer schrägen Zellwand oder mit Dreiecksquerschnitt lassen sich leicht mittels 3D-Druck erzeugen. Mittels 3D-Druck können Strukturen mit vertikalen oder schrägen Zellwänden (Schrägen von 45° oder mehr) leicht hergestellt werden. Dies ist am einfachsten gewährleistet, wenn der Dreiecksquerschnitt der Hohlräume einen rechten Winkel aufweist. Auch geeignet ist ein rautenförmiger Querschnitt, ein fünfeckiger Querschnitt oder ein hausförmiger Querschnitt - Anspruch 10.

[0019] Für den optimalen Wärmetausch zwischen dem Helium in den rohrförmigen Hohlräumen und dem Arbeitsgas Helium außerhalb der Hohlräume sind zwischen den rohrförmigen Hohlräumen Strömungskanäle angeordnet - Anspruch 11.

[0020] Durch die vorteilhafte Ausgestaltung nach Anspruch 12, bei der der scheibenförmige Regenerator aus einer oder mehreren scheibenförmigen Zellen besteht und jede Zelle jeweils zwei Halbzellen umfasst, wird erreicht, dass beide Halbzellen mittels 3D-Druck herstellbar sind. Gleichzeitig erhöht sich der Anteil des Volumens der Hohlräume - und damit des Heliums in den Hohlräumen - am Gesamtvolumen des Regenerators im Vergleich zu Regeneratoren, die nur einteilige Zellen aufweisen. Dies erhöht die Wärmespeicherfähigkeit des Regenerators oder der Regenerator kann bei gleicher Wärmekapazität kompakter ausgeführt werden.

[0021] Bei 3D-Druck-Verfahren können quaderförmige Hohlräume oder ellipsoidförmige Hohlräume als Ganzes oder in zwei Schritten aus zwei Komponenten hergestellt werden - Anspruch 13 oder 14. Nach Anspruch 14 wird zunächst eine erste Komponente mit "offenen Hohlräumen" bzw. mit topfförmigen Vertiefungen erzeugt. Diese Vertiefungen werden dann in einem zweiten Schritt durch zweite Komponenten abgedeckt. Die ersten und zweiten Komponenten werden dauerhaft miteinander verbunden, z. B. durch Verklebung oder Verschweißung.

[0022] Die Regeneratoren gemäß der vorliegenden Erfindung sind besonders für insbesondere für Stirling-, Gifford-McMahon- oder Pulsrohr-Kühler geeignet - Anspruch 15.

[0023] Die Hohlkörper bestehen aus Metall und/oder und können aufgrund der Druckausgleichsöffnung gegenüber dem Stand der Technik sehr dünn ausgebildet werden, wodurch der Wärmeübergangswiderstand zwischen dem Helium im Inneren der Hohlräume und dem

Arbeitsgas Helium außerhalb Hohlräume sinkt. Die Zellwände der Hohlräume weisen zumindest entlang der Strömungskanäle vorzugsweise eine konstante Dicke auf und liegen im Bereich zwischen 0,1mm und 0,5mm. Durch die konstante Wandstärke der Zellwände wird zwischen dem Arbeitsgas Helium in den Strömungskanälen und dem Helium in den Hohlräumen ein gleichmäßiger Wärmeübergang erreicht.

[0024] Der gesamte Regenerator weist in Strömungsrichtung des Arbeitsgases vorzugsweise eine Dicke von 5mm bis 100mm auf.

[0025] Die übrigen Ansprüche beziehen sich auf weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung.

[0026] Nachfolgend werden bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung anhand der Zeichnung beschrieben.

[0027] Es zeigt:

Fig. 1 eine Schnittdarstellung einer ersten Ausführungsform des Regenerators in einem Strömungskanal für Arbeitsgas,

Fig. 2 eine Schnittdarstellung der ersten Ausführungsform entlang II - II in Fig. 1,

Fig. 3a und 3b eine schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform,

Fig. 4 eine schematische Darstellung einer dritten Ausführungsform,

Fig. 5 eine schematische Darstellung einer vierten Ausführungsform,

Fig. 6 eine schematische Darstellung einer fünften Ausführungsform,

Fig. 7 eine sechste Ausführungsform, die nicht durch die beanspruchte Erfindung abgedeckt ist, in Form einer dreidimensionalen Matrixanordnung mit zwei Lagen von Zellen mit einem kreisringförmigen Außendurchmesser,

Fig. 8, die nicht durch die beanspruchte Erfindung abgedeckt ist, eine Detaildarstellung der Matrixanordnung mit drei Lagen von Zellen senkrecht zur Strömungsrichtung des Arbeitsgases betrachtet,

Fig. 9 und 10 schematische Darstellungen zur Herstellung des Regenerators aus einer Schalenstruktur und einer Abdeckung gemäß einer siebten Ausführungsform,

Fig. 11 eine achte Ausführungsform der Erfindung, die aus zwei mittels 3D-Druck hergestellten Strukturen besteht,

Fig. 12a, 12b und 12c Beispiele für Querschnitte der

Hohlräume mit dem wärmespeichernden Helium, die sich ohne weiteres mittels 3D-Druck herstellen lassen,

Fig. 13 den typischen Aufbau eines Kryo-Kühlers in Form einer Pulsrohrkühlers mit zwei Kaltstufen, wobei die zweite Kaltstufe einen Tieftemperatur-Regenerator aufweist, und

Fig. 14 den schematischen Aufbau eines Tieftemperatur-Regenerators nach dem Stand der Technik mit seltenen Erden in Form von Kügelchen.

[0028] Die Figuren 1 und 2 zeigen eine erste Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Regenerators 1 in seiner einfachsten Form. Der Regenerator 1 besteht aus einer Zelle 2 mit Zellwänden 4, die einen Hohlraum 6 umschließen. Die Zellwände 4 weisen eine Außenseite 4a und einen Innenseite 4i auf. Die Zellwände 4 werden von einer Druckausgleichsöffnung in Form einer Kapillare 8 durchsetzt. Der Regenerator 1 weist einen kreisringförmigen Querschnitt auf und ist in einem rohrförmigen Strömungskanal 10 für Arbeitsgas Helium angeordnet. Das Innere des Hohlraums 6 ist mit Helium als Regeneratormedium oder als Wärme speicherndes Medium gefüllt. Der Regenerator 1 bzw. die Zelle 2 ist so dimensioniert, dass zwischen dem rohrförmigen Strömungskanal 10 für Arbeitsgas und der Außenseite 4a der Zellwand 4 ein Ringspalt 12 verbleibt. Damit kann das Arbeitsgas Helium den Regenerator 1 umströmen und über die Wärme leitenden Zellwände 4 mit dem Helium im Hohlraum 6 Wärme austauschen.

[0029] Fig. 3a und 3b zeigen eine zweite Ausführungsform der Erfindung mit einer scheibenförmigen Zelle 2. Die Zelle 2 unterscheidet sich von der Zelle 2 nach Figur 1 und 2 dadurch, dass die Zelle 2 gemäß der zweiten Ausführungsform von einer Mehrzahl von geradlinig in einer Ebene verlaufenden Schlitzen 20 als Strömungskanäle für Arbeitsgas durchsetzt ist. Die schlitzförmigen Strömungskanäle 20 verlaufen parallel zueinander, enden jedoch vor dem Rand der Zelle 2, so dass die Zelle 2 nicht auseinander fallen kann. In den durch Zellwände 4 umschlossenen quaderförmigen Bereichen zwischen den schlitzförmigen Strömungskanälen 20 befinden sich rohrförmige Hohlräume 6 mit einem rechteckigen Querschnitt. Alle Hohlräume 6 münden in einen am Rand der scheibenförmigen Zelle 2 vorgesehenen umlaufenden Kanal 24, so dass die Hohlräume 6 und der umlaufende Kanal 24 einen einzigen Hohlraum bilden.

[0030] Bei der Herstellung der scheibenförmigen Zelle 2 mittels 3D-Druck verbleiben zunächst eine oder zwei größere Öffnungen 22 durch die das lose 3D-Druck-Material noch dem 3D-Druck ausgeblasen werden kann. Diese Öffnungen werden anschließend verschlossen, so dass lediglich eine oder mehrere Druckausgleichsöffnungen 8 in Form von Kapillaren verbleiben. Es lassen sich auch mehrere Zellen 2 in Strömungsrichtung des Arbeitsgases hintereinander anordnen, wodurch sich ein Rege-

nerator mit höherer Leistung ergibt.

[0031] Fig. 4 zeigt eine dritte Ausführungsform der Erfindung, bei der eine Mehrzahl von Zellen 2-1, 2-2, 2-3 übereinander gestapelt sind. Die drei scheibenförmigen Zellen 2-i mit kreisförmigem Querschnitt weisen einen identischen Aufbau auf. Die Zellen 2-i ähneln der Zelle 2 der zweiten Ausführungsform und unterscheiden sich von der Zelle nach Figur 1 und 2 dadurch, dass die Zellen 2-i von einer Mehrzahl von geradlinig in einer Ebene verlaufenden Schlitzen 20 als Strömungskanäle für Arbeitsgas durchsetzt sind. Die schlitzförmigen Strömungskanäle 20 verlaufen parallel zueinander, enden jedoch vor dem Rand der Zellen 2-i, sodass die Zelle 2 nicht auseinander fallen kann. In den durch Zellwände 4 umschlossenen quaderförmigen Bereichen zwischen den schlitzförmigen Strömungskanälen 20 befinden sich rohrförmige Hohlräume 6-i, die einen Querschnitt in Form eines gleichseitigen Dreiecks mit rechtem Winkel aufweisen. Die Spitze des Dreiecks mit dem rechten Winkel zeigt nach oben, so dass sich die beiden Seiten des gleichseitigen Dreiecks in einem Winkel von 45° nach oben erstrecken. Hohlräume 6-i mit dreieckigem Querschnitt lassen sich leicht mittels 3D-Druck herstellen. Bei der Herstellung der scheibenförmigen Zellen 2 mittels 3D-Druck verbleibt zunächst eine oder zwei größere Öffnungen 22 durch die das lose 3D-Druck-Material noch dem 3D-Druck ausgeblasen werden kann. Diese Öffnungen werden anschließend verschlossen, so dass lediglich eine oder mehrere Druckausgleichsöffnungen 8 in Form von Kapillaren verbleiben.

[0032] Die Hohlräume 6-i sind am Rand der scheibenförmigen Zellen 2-i miteinander verbunden. Eine Druckausgleichsöffnung 8 verbindet die Hohlräume 6-i mit dem Bereich außerhalb der Zellen 2-i. Die Zellen 2-i weisen auf ihrer Oberseite eine Mehrzahl von Ausrichtzapfen 30 auf und an der gegenüberliegenden Seite sind entsprechende Ausrichtvertiefungen 32 angeordnet. Durch diese Ausrichtelemente 30, 32 wird erreicht, dass die schlitzförmigen Strömungskanäle 20 der übereinander liegenden Zellen 6-i zueinander fluchten, sodass sich durch den Regenerator durchgehende Strömungskanäle ergeben. Zwischen den einzelnen Zellen 6-i ist jeweils eine thermisch-isolierende Schicht 34 angeordnet, die von dem Ausrichtzapfen 30 durchsetzt wird, sodass die Ausrichtzapfen in die darüber liegenden Ausrichtöffnungen 32 eingreifen können.

[0033] Fig. 5 zeigt schematisch eine vierte Ausführungsform des Regenerators in Form einer scheibenförmigen Zelle 2, die sich von den Zellen 2-i nach Fig. 4 dadurch unterscheidet, dass statt einem rohrförmigen Hohlraum mit Dreiecksquerschnitt jeweils zwei rohrförmige Hohlräume 6a und 6b vorgesehen sind. Der Querschnitt der rohrförmigen Hohlräume 6a und 6b weist ebenfalls die Form eines gleichseitigen Dreiecks mit rechtem Winkel auf. Der rechte Winkel setzt an der Innenseite der Trennwand 4 an, die die schlitzförmigen Strömungskanäle begrenzt. Hierdurch ergibt sich eine Trennwand 4 mit konstanter Wandstärke zwischen den

Strömungskanälen 20 und den Hohlräumen 6-i. Dies führt zu einem verbesserten Wärmeübergang zwischen dem Arbeitsgas im Strömungskanal 20 und dem Helium in den Hohlräumen 6a und 6b. Die Druckausgleichsöffnung 8 verbindet die Hohlräume 6a, 6b mit dem Bereich außerhalb der Zelle 2.

[0034] Fig. 6 zeigt eine fünfte Ausführungsform der Erfindung, die sich von der Ausführungsform nach Figur 4 lediglich dadurch unterscheidet, dass die rohrförmigen Hohlräume 6a, 6b mit Dreiecksquerschnitt mit der Basis des rechtwinkligen Dreiecks zu den Strömungskanälen 20 hin angeordnet sind. Da die Basis die Länge der Seite des gleichseitigen Dreiecks ist, wird hierdurch der Wärmeübergang verbessert.

[0035] Figuren 7 und 8 zeigen schematisch den Aufbau einer sechsten Ausführungsform, die nicht durch die beanspruchte Erfindung abgedeckt ist. Fig. 7 zeigt einen Regenerator 101 mit einer Vielzahl von Zellen 102, die in Form einer 3-dimensionalen Matrix 103 mit zwei Lagen von Zellen 102 angeordnet sind. Die Zellen 102 sind würfelförmig und grundsätzlich in ihrem Aufbau identisch. Da jedoch der Regenerator 101 einen Rohrquerschnitt ausfüllt, weisen die Zellen 102 im Randbereich zwangsweise eine abweichende Form auf. Die einzelnen Zellen 102 umfassen jeweils einen würfelförmigen Hohlraum 106 mit einer Wärme leitenden Hülle 104 und einer Druckausgleichsöffnung 108 in Form einer Kapillare. Wie aus Fig. 8 zu ersehen ist, sind die einzelnen Zellen 102 in Strömungsrichtung 112 des Arbeitsgases hintereinander versetzt angeordnet. Die nebeneinander liegenden Zellen 102 sind mittels thermisch leitender Verbindungselemente 114 miteinander verbunden. Die in Strömungsrichtung 112 hintereinander liegenden Zellen 102 sind mit thermisch isolierenden bzw. schlecht leitenden Verbindungselementen 116 miteinander verbunden und bilden einen Strömungskanal 120. Auf diese Weise ergibt sich die mechanisch feste Matrixanordnung 103 aus Zellen 102. In Fig. 7 sind lediglich zwei Lagen von Zellen 102 gezeigt, während in Fig. 8 drei Schichten bzw. Lagen von Zellen 102 gezeigt sind. Das Gasvolumen der einzelnen Hohlräume 106 beträgt ca. 1 mm^2 , die Wandstärke der Hülle 104 beträgt ca. 0,2 mm. Der Abstand zwischen den einzelnen Zellen 102 beträgt ca. 0,2 mm. Der gesamte Platzbedarf einer Zelle 102 beträgt ca. 8 mm^3 .

[0036] Der erfindungsgemäße Regenerator 101 wird vorzugsweise in der kältesten Kaltstufe eines Kryo-Kühlers als Tieftemperatur-Regeneratorabschnitt 242 eingesetzt.

[0037] Figuren 9 und 10 zeigen siebte Ausführungsform der Erfindung, bei der die Zelle 2 mit schlitzförmigen Strömungskanälen 20 entsprechend den Ausführungsformen nach den Figuren 3 bis 6. Der Unterschied zu den Ausführungsformen nach den Figuren 4 bis 6 besteht in der Form der rohrförmigen Hohlräume 6'. Die Hohlräume 6' sind wie bei der zweiten Ausführungsform nach Fig. 3a und 3b im Querschnitt rechteckig. Die Herstellung erfolgt - im Gegensatz zu der zweiten Ausführungsform in zwei Schritten mit wenigstens zwei Komponenten. Zu-

nächst wird eine erste Komponente 40 mit "offenen Hohlräumen" bzw. mit topfförmigen Vertiefungen 42 erzeugt, z. B. mittels 3D-Druck. Loses 3D-Druck-Material wird in einem zweiten Schritt aus den topfförmigen Vertiefungen entfernt. Dann werden die Vertiefungen 42 in einem dritten Schritt durch zweite Komponenten 44 abgedeckt. Die ersten und zweiten Komponenten 40, 44 werden dauerhaft miteinander verbunden, z. B. durch Verklebung oder Verschweißung.

[0038] Fig. 11 zeigt eine achte Ausführungsform der Erfindung in Form einer scheibenförmigen Zelle 2, die aus einer ersten und einer zweiten Halbzelle 50, 52 zusammengesetzt ist, so dass sich eine Zelle 2 ergibt die analog den Ausführungsformen nach Fig. 5 und 6 zwischen den schlitzförmigen Strömungskanälen 20 Strukturen im Querschnitt quaderförmige Strukturen aufweist. Beide Halbzellen 50, 52 weisen jeweils eine Mehrzahl von ersten und zweiten Hohlräumen 54 und 56 mit einem Querschnitt eines gleichschenkeligen Dreiecks auf. Die beiden Halbzellen 50, 52 lassen sich mittels 3D-Druck herstellen. Die beiden Halbzellen weisen jeweils eine plane Seite 58 und eine unebene Seite 60 auf. Die beiden unebenen Seiten 60 weisen eine komplementäre Form auf und wenn die beiden Halbzellen 50, 52 zusammengesetzt sind, liegen die komplementären unebenen Seiten 60 der beiden Halbzellen aufeinander. Im Vergleich zu den Ausführungsformen nach Fig. 4 bis 6 vergrößert sich bei den Regeneratoren mit Zellen 2, die jeweils zwei Halbzellen 50, 52 aufweisen der Anteil des Hohlraumvolumens am Gesamtvolumen des Regenerators. Der Regenerator wird dadurch leistungsfähiger.

[0039] Analog der zweiten Ausführungsform nach Fig. 3a und 3b weisen auch die Ausführungsformen nach Fig. 4 bis 6 und 9 bis 11 einen umlaufenden Kanal 24 auf.

[0040] Die Druckausgleichsöffnung 8 ist in den Figuren 2 bis 6 und 9 bis 11 nicht eingezeichnet aber vorhanden. Da die Hohlräume 6-i; 6', 6a, 6b miteinander verbunden sind, kann die Druckausgleichsöffnung 8 an beliebiger Stelle der Zellen 2 vorgesehen sein.

[0041] Die Figuren 12a, 12b und 12c zeigen mögliche weitere Querschnittsformen der Hohlräume 6 in den scheibenförmigen Regeneratoren nach den Figuren 3 bis 6 und 11, die sich einfach mittels 3D-Druck herstellen lassen.

Bezugszeichenliste:

[0042]

1	Regenerator
2	Zelle
4	Zellwand
4i	Innenseite der Zellwand 4
4a	Außenseite der Zellwand 4
6, 6-i, 6a, 6b	Hohlraum
8	Druckausgleichsöffnung
10	Strömungskanal für Arbeitsgas
12	Ringspalt zwischen 2 und 10

20	schlitzförmige Strömungskanäle für Arbeitsgas	
22	Ausblasöffnungen	
24	umlaufender Verbindungskanal	
30	Ausrichtzapfen	5
32	Ausrichtvertiefungen	
34	thermisch isolierende Schicht	
40	erste Komponente mit topfförmigen Vertiefungen	
42	topfförmige Vertiefungen	10
44	Abdeckungen	
50	erste Halbzelle	
52	zweite Halbzelle	
54	erste Hohlräume	15
56	zweite Hohlräume	
58	plane Seite von 50, 52	
60	uneben Seite von 50, 52	
101	Regenerator	20
102	Zellen	
103	Matrixanordnung	
104	Hülle bzw. Zellwände	
106	Hohlraum	
108	Druckausgleichsöffnung	25
112	Strömungsrichtung des Arbeitsgases	
114	thermisch leitende Verbindungselemente	
116	thermisch isolierende Verbindungselemente	
120	Strömungskanal	30
220	erste Kaltstufe	
222	zweite Kaltstufe	
224	erstes Pulsrohr	
226	erster Regenerator	
228	zweites Pulsrohr	35
230	zweiter Regenerator	
232	Verbindungsmittel	
234	Arbeitsgasleitungen	
236	Ventile	
238	Balastvolumen	40
240	erster Regeneratorabschnitt von 230	
242	Tieftemperatur-Regeneratorabschnitt von 230	
244	Metallsiebe in 230	
246	Kügelchen aus seltenen Erdverbindungen	45

Patentansprüche

1. Regenerator für Kryo-Kühler mit Helium als Arbeitsgas, mit

wenigstens einer Zelle (2) mit Zellwänden (4), die eine Außenseite (4a) und eine Innenseite (4i) aufweisen;
wobei die Zellwände (4) wenigstens teilweise Wärme leitend sind,
wobei die wenigstens eine Zelle (2) mehrere miteinander verbundene Hohlräume (6; 6-i; 6a, 6b)

aufweist, die von den Zellwänden (4) umschlossen sind,
wobei die Außenseite (4a) der Zellwände (4) wenigstens teilweise einen Strömungskanal für das Arbeitsgas Helium begrenzen;
wobei die wenigstens eine Zelle (2) eine Druckausgleichsöffnung (8) aufweist,
wobei die wenigstens eine Zelle (2) Strömungskanäle (20) für das Arbeitsgas aufweist, die durch die Zellwände (4) begrenzt sind, und
wobei die Hohlräume (6; 6-i; 6a, 6b) mit Heliumgas als Wärmespeichermaterial gefüllt sind,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Druckausgleichsöffnung (8) als Kapillare ausgebildet ist, und
die Strömungskanäle (20) als eine Mehrzahl von Schlitzten ausgebildet sind, die geradlinig und parallel zueinander verlaufen und vor dem Rand der Zelle (2) enden, sodass die Zelle (2) nicht auseinanderfallen kann, und
ein umlaufender Kanal (24) an dem Rand der Zelle (2) ausgebildet ist, in den die mehrere miteinander verbundenen Hohlräume (6; 6-i; 6a, 6b) münden.

2. Regenerator nach einen der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die wenigstens eine Zelle (2) als Scheibe mit einem runden Querschnitt ausgebildet ist.

3. Regenerator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Mehrzahl von Zellen (2) in Strömungsrichtung des Arbeitsgases hintereinander angeordnet ist.

4. Regenerator nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** in Strömungsrichtung des Arbeitsgases hintereinander angeordnete Zellen (2) durch eine thermisch isolierende Schicht (34) mit Strömungskanälen (20) für das Arbeitsgas voneinander getrennt sind.

5. Regenerator nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Zellen (2) und die thermisch isolierende Schicht (34) jeweils Ausrichtelemente (30, 32) aufweisen, so dass die Strömungskanäle (20) der Zellen (2) und der thermisch isolierenden Schicht oder Schichten (34) miteinander fluchten.

6. Regenerator nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ausrichtelemente mehrere Ausrichtzapfen (30) auf einer Seite der Zellen (2) und komplementär geformte Ausrichtvertiefungen (32) auf der anderen Seite der Zellen umfassen.

7. Regenerator nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die thermisch isolierende Schicht (34) Ausrichtöffnungen aufweist, die von den Aus-

richtzapfen (30) durchsetzt sind, so dass die Strömungskanäle (20) für das Arbeitsgas in den Zellen (2) und in der thermisch isolierenden Schicht (34) miteinander fluchten.

8. Regenerator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich die Druckausgleichsöffnung (8) aufgrund von Undichtigkeiten während der Herstellung des Regenerators ergibt.

9. Regenerator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Außenseite der Zellwände (4) in den Strömungskanälen (20) für Arbeitsgas Verwirbelungsstrukturen aufweisen.

10. Regenerator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Hohlräume (6-i; 6', 6a, 6b) rohrförmigen sind und einen Querschnitt in Form eines Dreiecks, einen Querschnitt in Form eines Rechtecks oder einen Querschnitt mit wenigstens einer schräge Zellwand umfassen.

11. Regenerator nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei mehreren rohrförmigen Hohlräumen (6-i; 6', 6a, 6b) pro Zelle (2) zwischen den rohrförmigen Hohlräumen (6-i; 6', 6a, 6b) Strömungskanälen (20) für das Arbeitsgas angeordnet sind.

12. Regenerator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,**

dass die Zellen (2) aus zwei Halbzellen (51, 50) zusammengesetzt sind, die jeweils mehrere Hohlräume mit einem Querschnitt in Form eines Dreiecks aufweisen,

dass die rohrförmigen Hohlräume (6-i; 6', 6a, 6b) zwischen den Strömungskanälen (20) für das Arbeitsgas angeordnet sind,

dass jede Halbzelle eine plane Seite und eine unebene Seite aufweist,

dass die unebenen Seiten der beiden Halbzellen komplementär zueinander ausgebildet sind, und

dass die beiden komplementären unebenen Seiten der beiden Halbzellen einander kontaktieren.

13. Verfahren zur Herstellung eines Regenerators nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Zelle (2) mittels 3D-Druck hergestellt wird.

14. Verfahren zur Herstellung eines Regenerators nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Zelle (2) aus we-

nigstens zwei Komponenten (40, 44) hergestellt ist, die nach Herstellung der beiden Komponenten (40, 44) miteinander verbunden werden, und dass wenigstens eine Komponente (40) eine Vertiefung (42) aufweist, die zumindest einen Teil des oder der Hohlräume (6') bildet.

15. Kryo-Kühler in Form eines Stirling-, Gifford-McMahon- oder Pulsrohrkühlers mit wenigstens einem Regenerator (1), **gekennzeichnet durch** einen Regenerator (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 12.

Claims

1. Regenerator for cryo-coolers with helium as a working gas, comprising

at least one cell (2) with cell walls (4) including an exterior (4a) and an inner side (4i);

wherein the cell walls (4) are at least partly heat conductive,

the at least one cell (2) has a plurality of cavities (6; 6-i; 6a, 6b) connected with each other, which are surrounded by cell walls (4),

the exterior (4a) of the cell walls (4) at least partly delimits a flow channel for the helium working gas;

the at least one cell (2) has a pressure-equalizing opening (8), and

the at least one cell (2) includes flow channels (20) for the working gas, which are delimited by cell walls (4; 104), and

the cavities (6; 6-i; 6a, 6b) are filled with helium gas as a heat storage material,

characterized in that

the pressure-equalizing opening (8) is formed as a capillary, and

the flow channels (20) are formed as a plurality of slots extending rectilinearly and parallel to each other and end before the rim of the cell (2) so that the cell (2) cannot fall apart,

a circumferential channel (24) is formed at the rim of the cell (2) into which the plurality of cavities (6; 6-i; 6a, 6b) connected with each other open.

2. Regenerator according to one of the preceding claims, **characterized in that** the at least one cell (2) is formed as a disk with a round cross-section.

3. Regenerator according to one of the preceding claims, **characterized in that** a plurality of cells (2) is arranged one behind the other in a flow direction of the working gas.

4. Regenerator according to claim 3, **characterized in**

that cells (2) arranged one behind the other in a flow direction of the working gas are separated from each other by a thermally insulating layer (34) including flow channels (20) for the working gas.

5. Regenerator according to claim 4, **characterized in that** the cells (2) and the thermally insulating layer (34) each have alignment elements (30, 32), so that the flow channels (20) of the cells (2) and the thermally insulating layer or layers (34) are in alignment with each other.

6. Regenerator according to claim 5, **characterized in that** the alignment elements include a plurality of alignment pins (30) on one side of the cells (2) and complementarily formed aligning recesses (32) on the other side of the cells.

7. Regenerator according to claim 6, **characterized in that** the thermally insulating layer (34) includes alignment openings that are permeated by the alignment pins (30), so that the flow channels (20) for the working gas in the cells (2) and in the thermally insulating layer (34) are in alignment with each other.

8. Regenerator according to one of the preceding claims, **characterized in that** the pressure-equalizing opening (8) results on account of leaks occurring during production of the regenerator.

9. Regenerator according to one of the preceding claims, **characterized in that** the exterior of the cell walls (4) has turbulence structures in the flow channels (20) for the working gas.

10. Regenerator according to one of the preceding claims, **characterized in that** the cavities (6-i; 6', 6a, 6b) have the shape of a tube and a cross-section in form of a triangle, a cross-section in form of a rectangle, or a cross-section with at least one slanting cell wall.

11. Regenerator according to claim 10, **characterized in that** in a plurality of tube-shaped cavities (6-i, 6', 6a, 6b), flow channels (20) for the working gas are arranged per cell (2) between the tube-shaped cavities (6-i, 6', 6a, 6b).

12. Regenerator according to one of the preceding claims, **characterized in that**

the cells (2) are composed of two half cells (51, 50), each including a plurality of cavities with a cross-section in form of a triangle, that the tube-shaped cavities (6-i; 6'; 6a, 6b) are arranged between the flow channels (20) for the working gas, that each of the half cells has a flat side and an

uneven side,

that the uneven sides of the two half cells are formed complementarily to each other, and that the two complementary uneven sides of the two half cells contact each other.

13. Method for producing a regenerator according to one of the preceding claims, **characterized in that** the cell (2) is produced by 3D printing.

14. Method for producing a regenerator according to one of claims 1 to 12, **characterized in that** the cell (2) is produced from at least two components (40, 44), which, after manufacture of the two components (40, 44), are connected to each other, and that at least one component (40) has a recess (42) forming at least part of the cavity/cavities (6').

15. Cryo-cooler in form of a Stirling cooler, a Gifford-McMahon cooler or a pulse tube cooler including at least one regenerator (1), **characterized in that** the at least one regenerator (1) is a regenerator according to one of the preceding claims 1 to 12.

Revendications

1. Régénérateur pour refroidisseur cryogénique avec de l'hélium comme gaz de travail, avec au moins une cellule (2) avec des parois de cellule (4) qui présentent un côté extérieur (4a) et un côté intérieur (4i) ;

dans lequel les parois de cellule (4) sont au moins partiellement thermoconductrices, dans lequel l'au moins une cellule (2) présente plusieurs espaces creux (6 ; 6-i ; 6a, 6b) reliés entre eux qui sont entourés par les parois de cellule (4),

dans lequel le côté extérieur (4a) des parois de cellule (4) délimitent au moins partiellement un canal d'écoulement pour le gaz de travail hélium ;

dans lequel l'au moins une cellule (2) présente une ouverture d'équilibrage de pression (8),

dans lequel l'au moins une cellule (2) présente des canaux d'écoulement (20) pour le gaz de travail qui sont délimités par les parois de cellule (4), et

dans lequel les espaces creux (6 ; 6-i ; 6a, 6b) sont remplis de gaz hélium comme matériau d'accumulation de chaleur,

caractérisé en ce que

l'ouverture d'équilibrage de pression (8) est réalisée comme capillaire, et

les canaux d'écoulement (20) sont réalisés comme une pluralité de fentes qui s'étendent en ligne droite et parallèlement les unes aux autres et se terminent devant le bord de la cellule (2)

- de sorte que la cellule (2) ne puisse tomber, et un canal périphérique (24) est réalisé au niveau du bord de la cellule (2), dans lequel les plusieurs espaces creux (6 ; 6-i ; 6a, 6b) reliés entre eux débouchent.
2. Régénérateur selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'au moins une cellule (2) est réalisée comme disque avec une section transversale ronde.
 3. Régénérateur selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'une** pluralité de cellules (2) est agencée dans le sens d'écoulement du gaz de travail les unes derrière les autres.
 4. Régénérateur selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** des cellules (2) agencées les unes derrière les autres dans le sens d'écoulement du gaz de travail sont séparées les unes des autres par une couche (34) thermo-isolante avec des canaux d'écoulement (20) pour le gaz de travail.
 5. Régénérateur selon la revendication 4, **caractérisé en ce que** les cellules (2) et la couche thermo-isolante (34) présentent respectivement des éléments d'orientation (30, 32) de sorte que les canaux d'écoulement (20) des cellules (2) et la couche ou les couches thermo-isolantes (34) s'alignent entre eux.
 6. Régénérateur selon la revendication 5, **caractérisé en ce que** les éléments d'orientation comportent plusieurs tenons d'orientation (30) sur un côté des cellules (2) et des cavités d'orientation (32) formées de manière complémentaire sur l'autre côté des cellules.
 7. Régénérateur selon la revendication 6, **caractérisé en ce que** la couche thermoisolante (34) présente des ouvertures d'orientation qui sont traversées par les tenons d'orientation (30) de sorte que les canaux d'écoulement (20) pour le gaz de travail s'alignent entre eux dans les cellules (2) et dans la couche thermo-isolante (34).
 8. Régénérateur selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'ouverture d'équilibrage de pression (8) résulte de fuites pendant la fabrication du régénérateur.
 9. Régénérateur selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le côté extérieur des parois de cellule (4) présente dans les canaux d'écoulement (20) des structures de tourbillons pour du gaz de travail.
 10. Régénérateur selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** les espaces creux (6-i ; 6', 6a, 6b) sont tubulaires et comportent une section transversale en forme de triangle, une section transversale en forme de rectangle ou une section transversale avec au moins une paroi de cellule oblique.
 11. Régénérateur selon la revendication 10, **caractérisé en ce qu'en** cas de plusieurs espaces creux (6-i ; 6', 6a, 6b) tubulaires par cellule (2), des canaux d'écoulement (20) pour le gaz de travail sont agencés entre les espaces creux (6-i ; 6', 6a, 6b) tubulaires.
 12. Régénérateur selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** les cellules (2) sont composées de deux demi-cellules (51, 50) qui présentent respectivement plusieurs espaces creux avec une section transversale en forme de triangle, **que** les espaces creux (6-i ; 6', 6a, 6b) tubulaires sont agencés entre les canaux d'écoulement (20) pour le gaz de travail, **que** chaque demi-cellule présente un côté plan et un côté non plan, **que** les côtés non plans des deux demi-cellules sont réalisés de manière complémentaire l'un à l'autre, et **que** les deux côtés non plans complémentaires des deux demi-cellules entrent en contact l'un avec l'autre.
 13. Procédé de fabrication d'un régénérateur selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la cellule (2) est fabriquée par impression en 3D.
 14. Procédé de fabrication d'un régénérateur selon l'une quelconque des revendications précédentes 1 à 12, **caractérisé en ce que** la cellule (2) est fabriquée à partir d'au moins deux composants (40, 44) qui sont reliés entre eux après fabrication des deux composants (40, 44), et qu'au moins un composant (40) présente une cavité (42) qui forme au moins une partie du ou des espaces creux (6').
 15. Refroidisseur cryogénique sous la forme d'un refroidisseur Stirling, Gifford, McMahon ou à tube pulsé avec au moins un régénérateur (1), **caractérisé par** un régénérateur (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 12.

Fig. 1

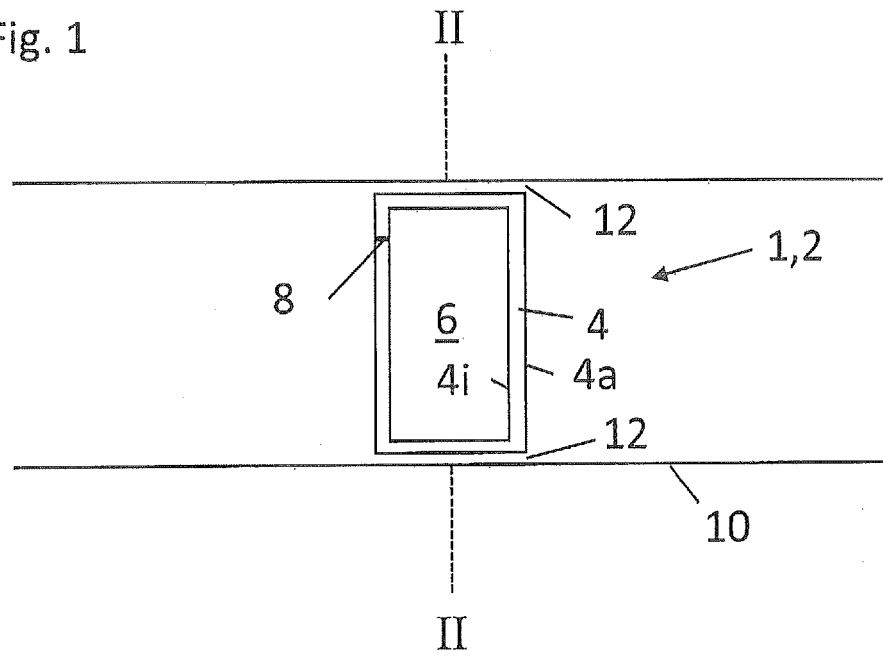


Fig. 2

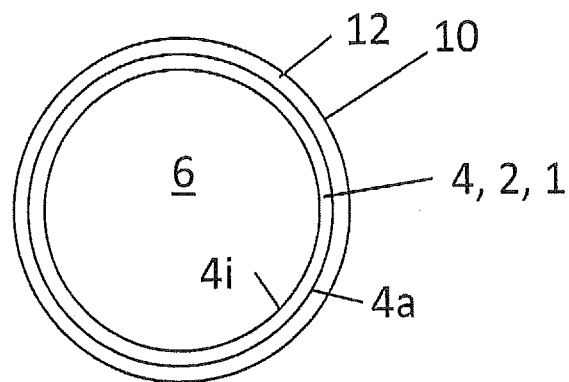


Fig. 3a

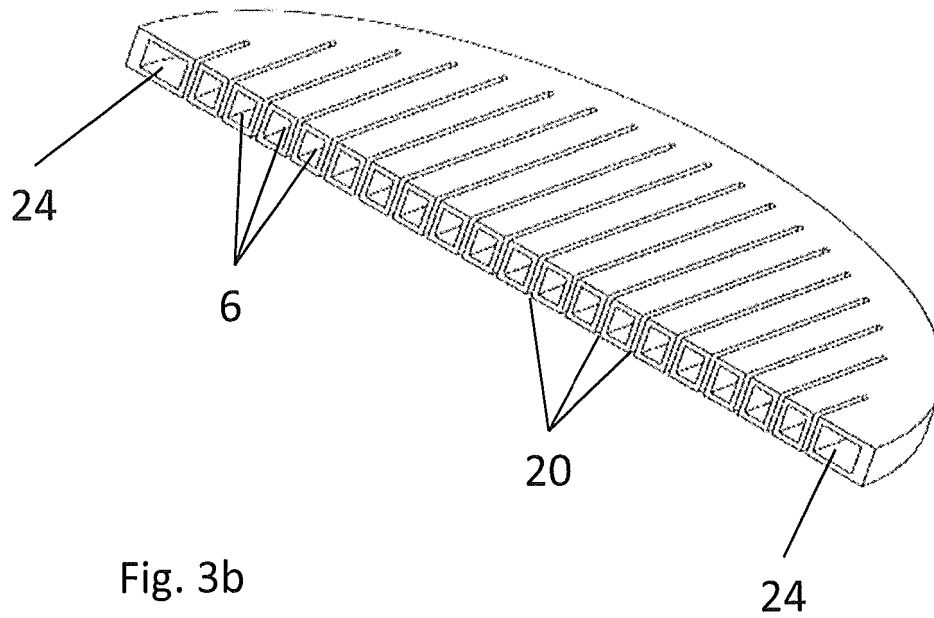


Fig. 3b

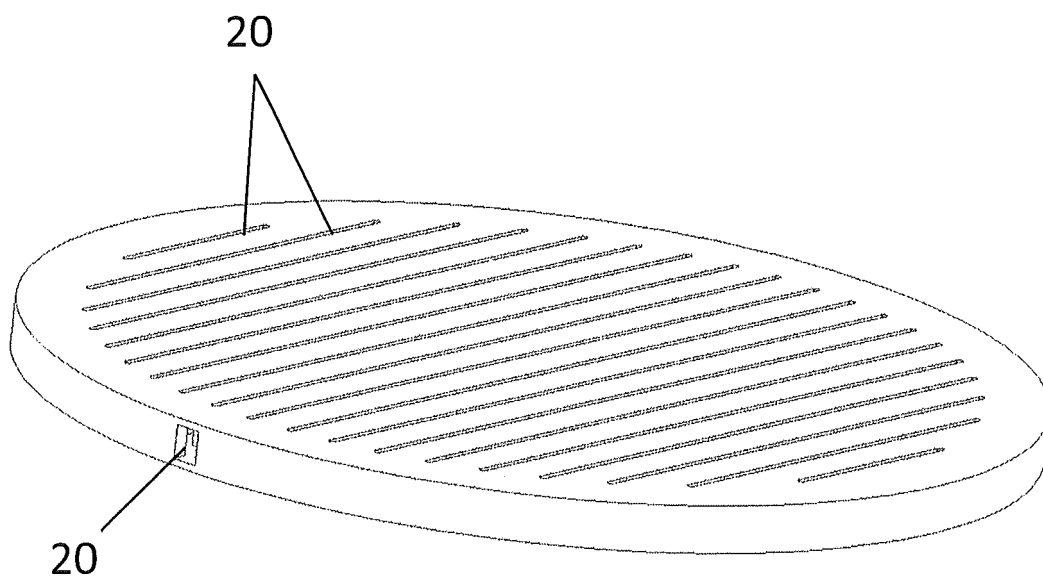


Fig. 4

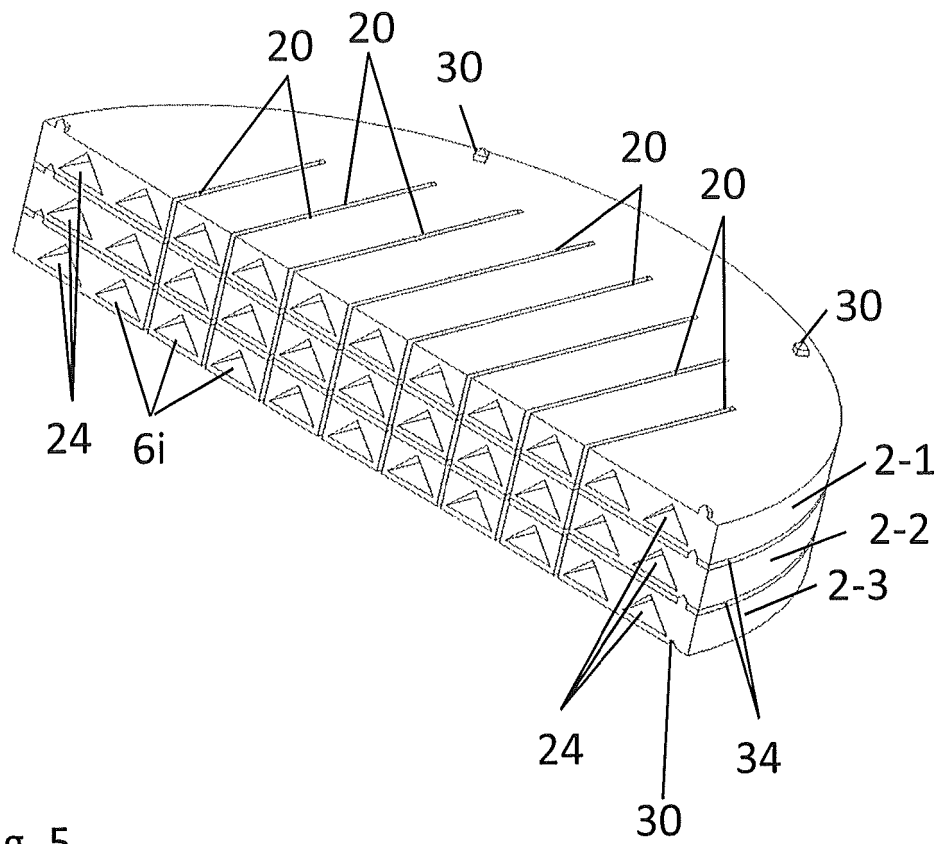


Fig. 5

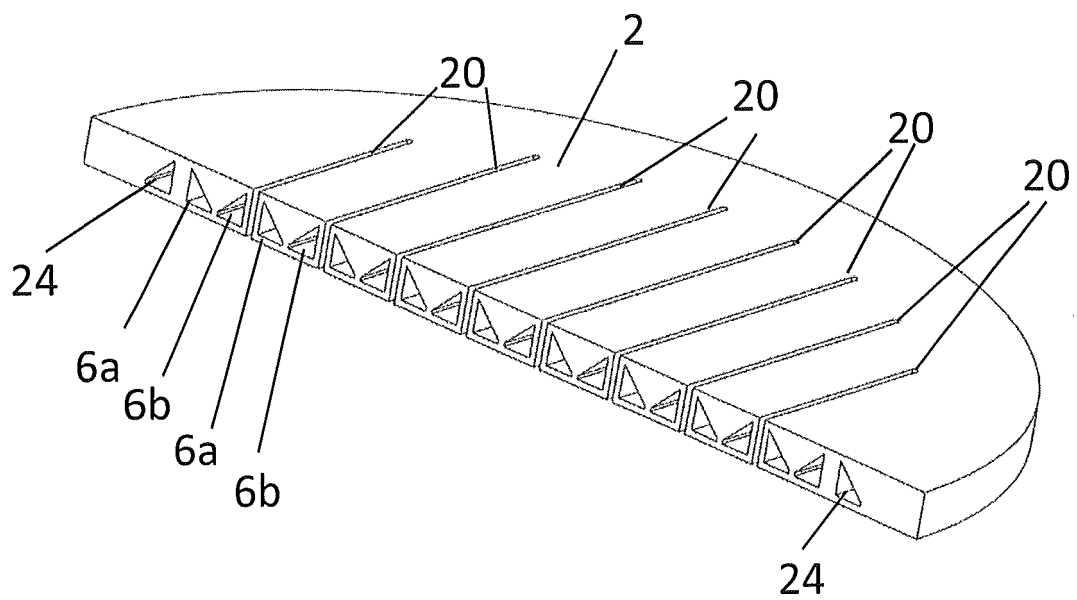


Fig. 6

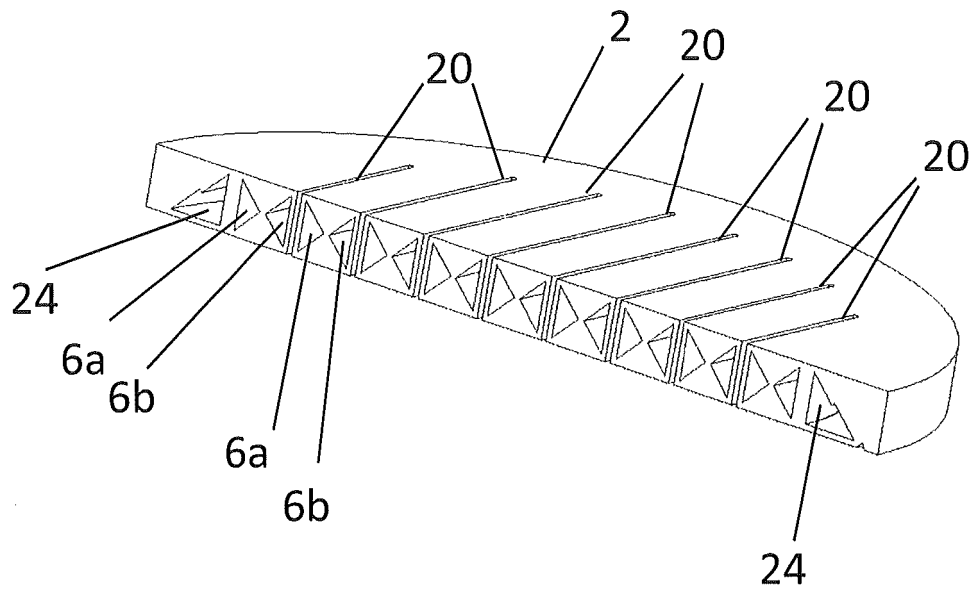


Fig. 7

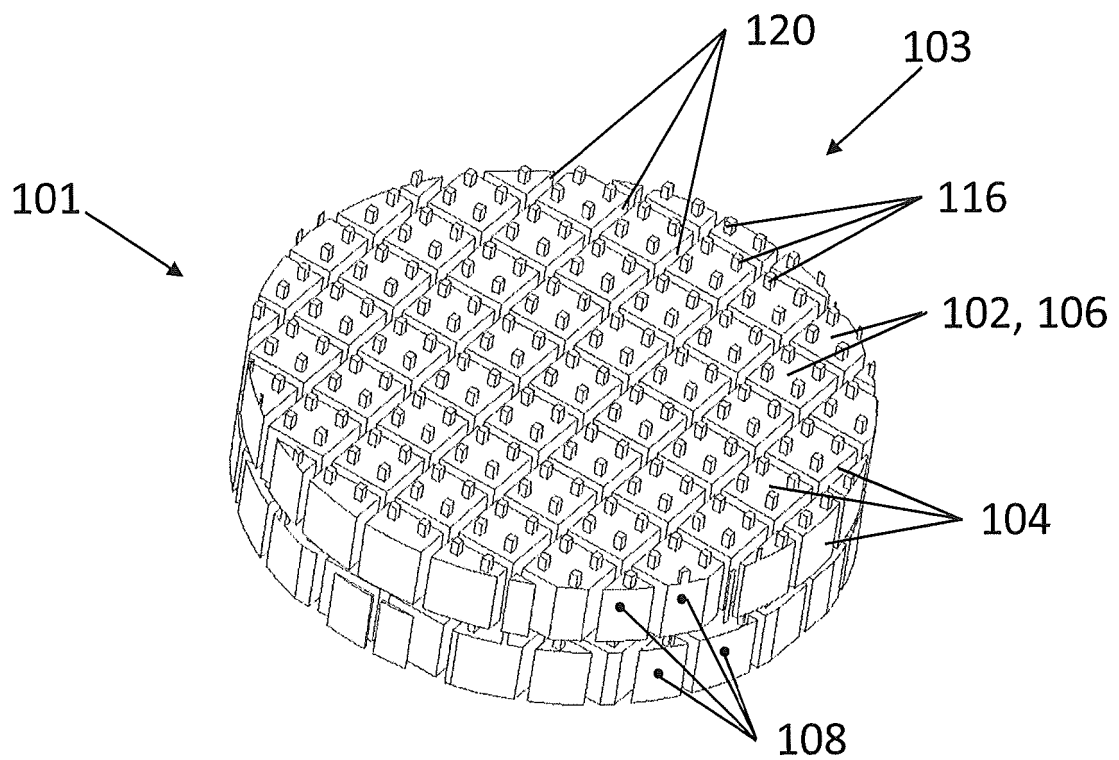


Fig. 8

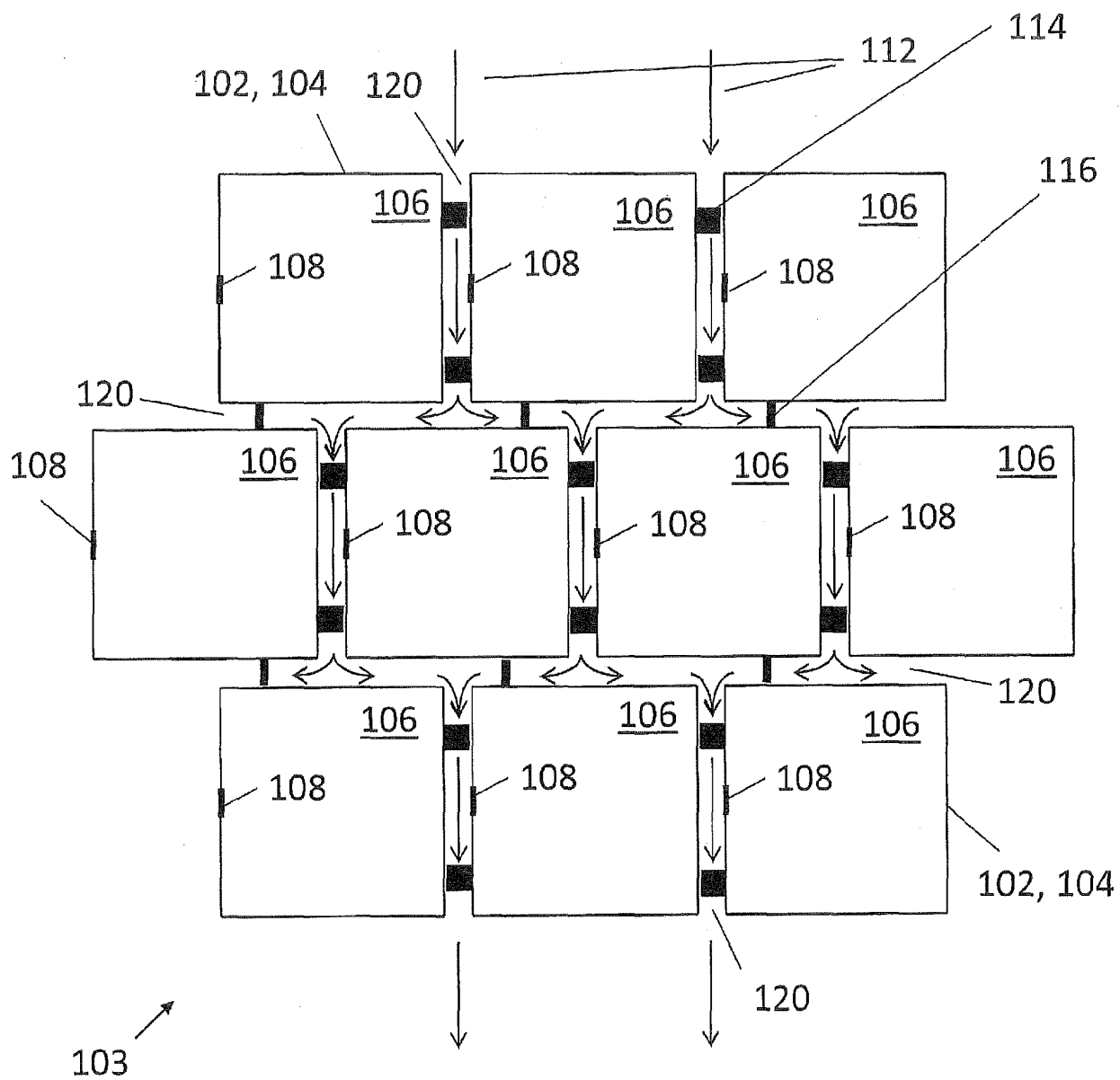


Fig. 9

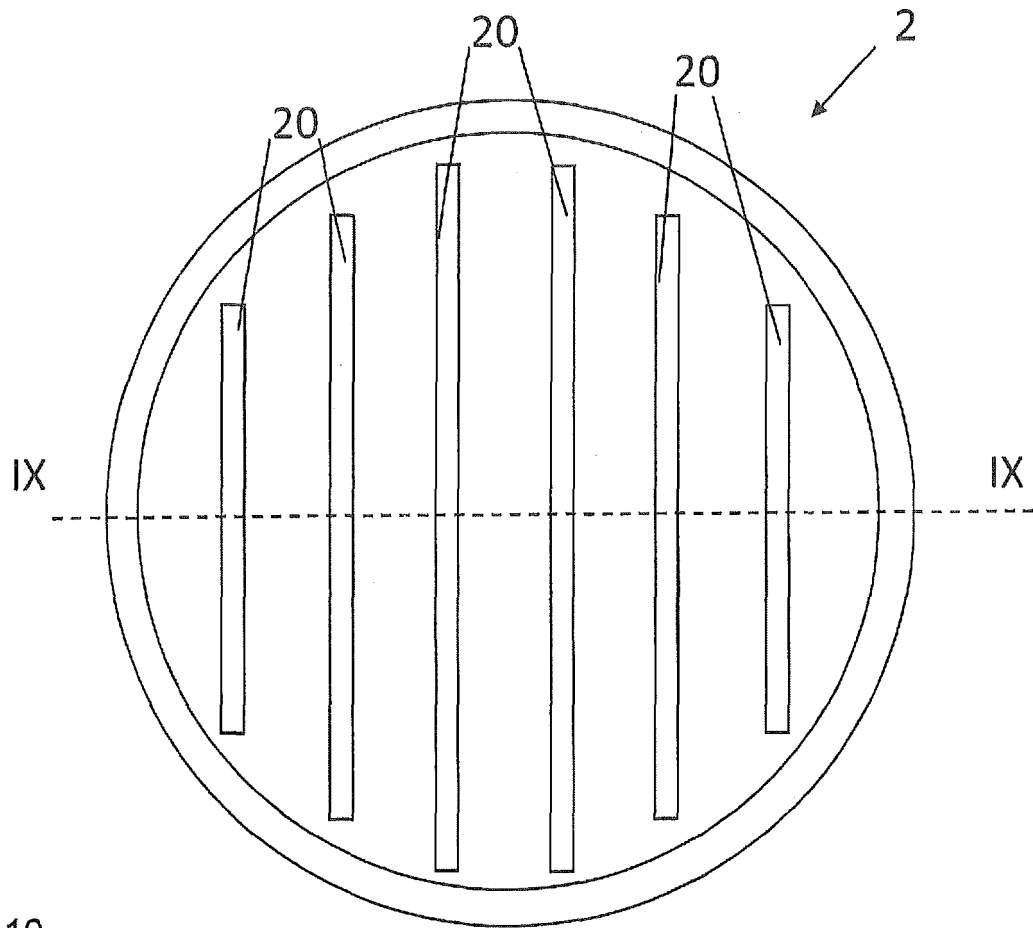


Fig. 10

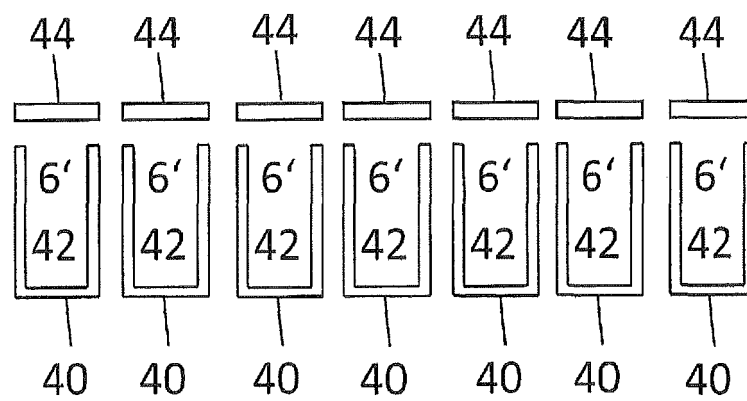


Fig. 11

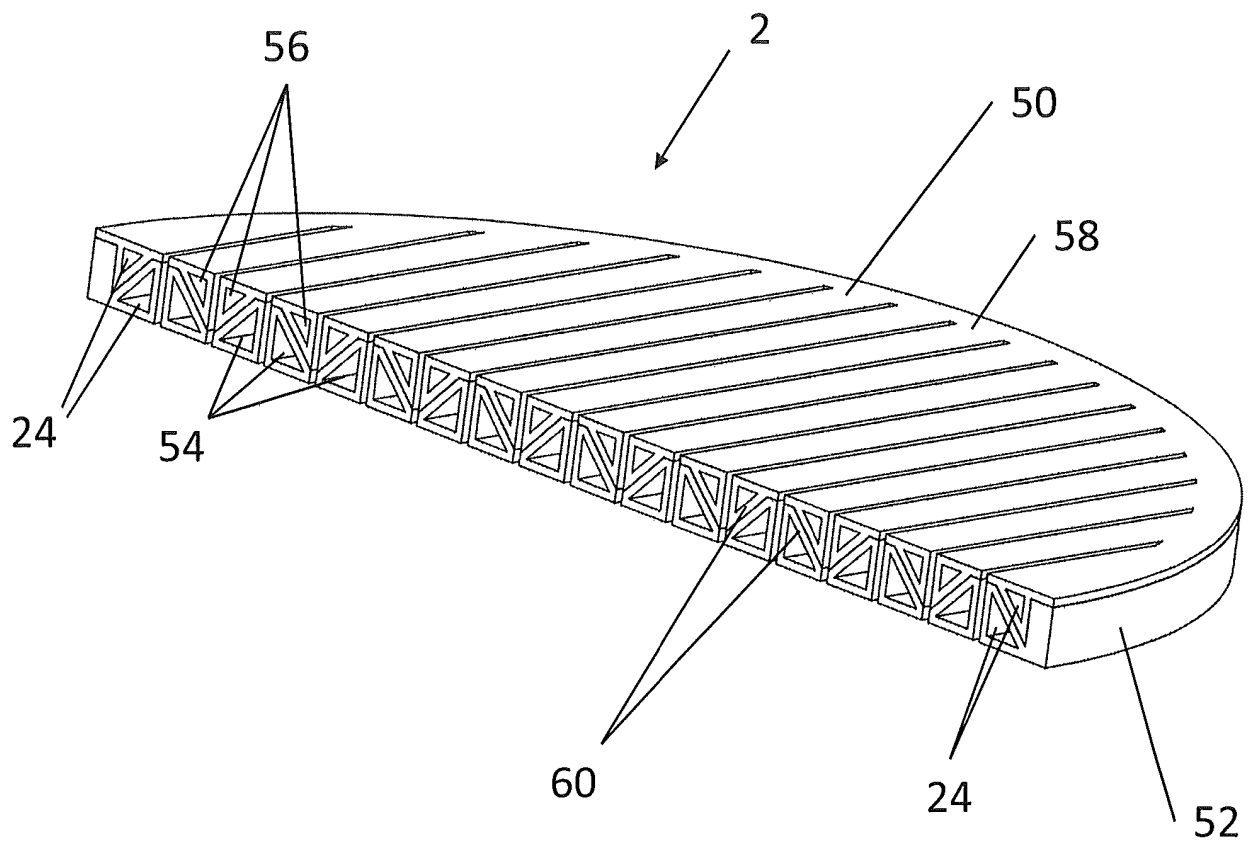


Fig. 12a

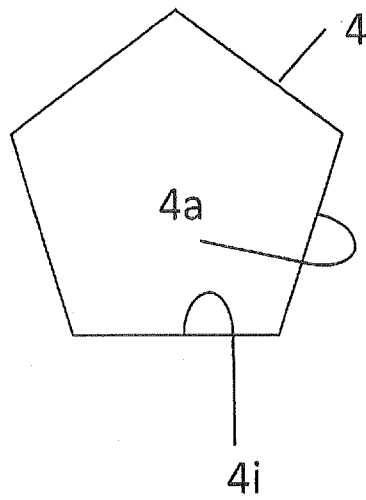


Fig. 12b

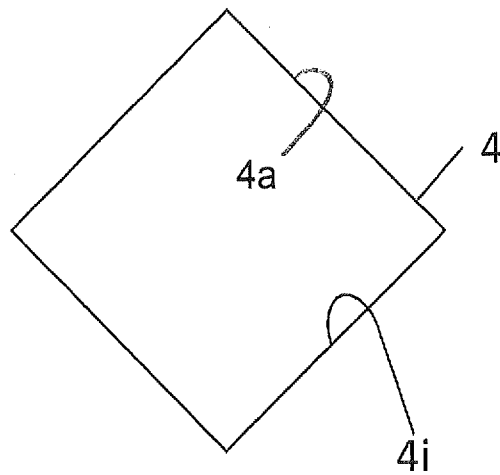


Fig. 12c

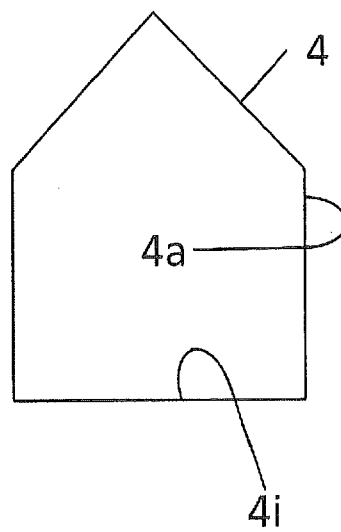


Fig. 13

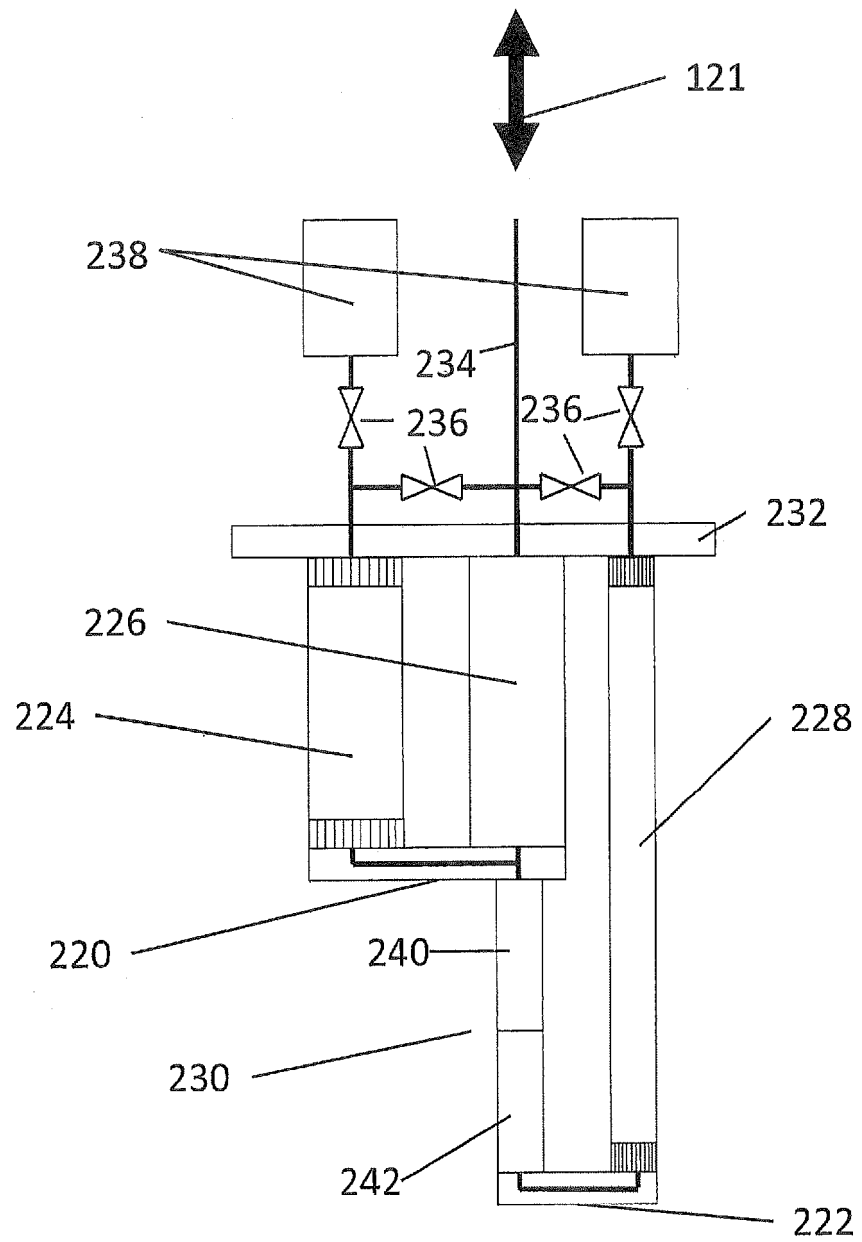
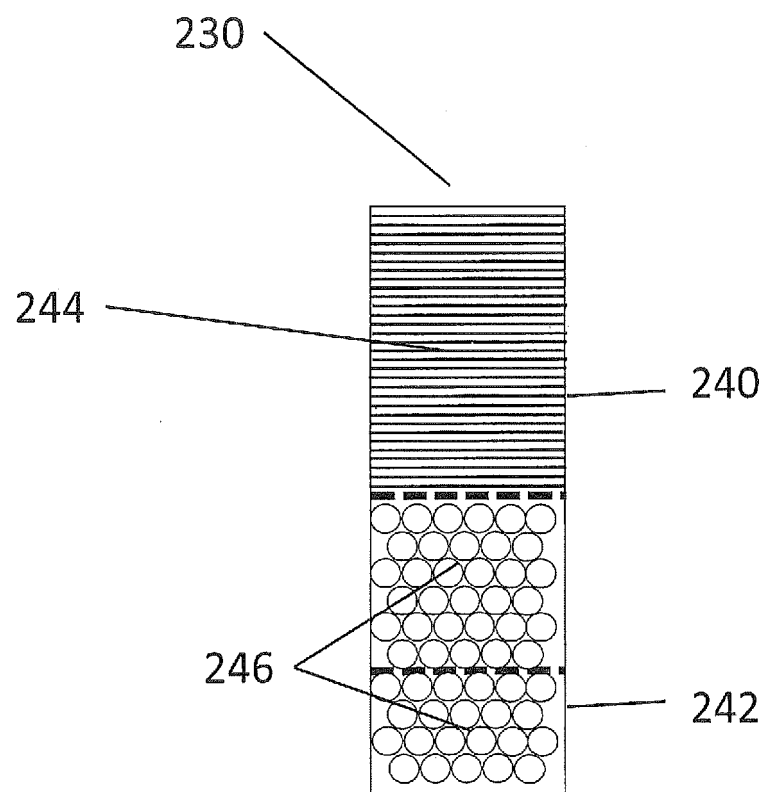


Fig. 14 – Stand der Technik



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

- US 20120304668 A1 [0003]
- DE 10319510 A1 [0003]
- DE 102005007627 A1 [0003]
- CN 104197591 A [0003]
- DE 19924184 A1 [0003]
- US 4359872 A [0003]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- Heat Capacity Characterization of a 4K Regenerator with Non-Rare Earth Material. Cryocoolers 19, International Cryocooler Conference. Inc., Boulder, CO, 2016 [0004]