



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 699 21 965 T2** 2005.11.03

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 053 437 B1**

(51) Int Cl.⁷: **F25B 21/00**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **699 21 965.5**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US99/01708**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **99 903 433.3**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 99/040378**

(86) PCT-Anmeldetag: **27.01.1999**

(87) Veröffentlichungstag

der PCT-Anmeldung: **12.08.1999**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **22.11.2000**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **17.11.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **03.11.2005**

(30) Unionspriorität:

18153 03.02.1998 US

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,
LI, LU, MC, NL, PT, SE**

(73) Patentinhaber:

**Astronautics Corp. of America, Milwaukee, Wis.,
US**

(72) Erfinder:

**LAWTON, M., Lewis, Barrington, US; ZIMM, B.,
Carl, Madison, US; JASTRAB, G., Alexander,
Cambridge, US**

(74) Vertreter:

**Rechts- und Patentanwälte Lorenz Seidler Gossel,
80538 München**

(54) Bezeichnung: **KÄLTEGERÄT MIT MAGNETISCH WIRKENDEM HUBKOLBENREGENERATOR**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung**GEBIET DER ERFINDUNG**

[0001] Diese Erfindung betrifft im Allgemeinen das Gebiet der magnetischen Kühlung und insbesondere aktive magnetische regenerative Kühlvorrichtungen.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0002] Die aktive magnetische Regeneration kombiniert einen Regenerator mit einer Vorrichtung, welche basierend auf dem magnetokalorischen Effekt arbeitet. Der Betrieb von aktiven magnetischen Regeneratoren wird in der US-Patentschrift No. 4 332 135 für Barclay, et al. beschrieben. Ein experimentelles Modell eines aktiven magnetischen Regenerators wurde gebaut und geprüft und wird in dem Artikel von A.J. DeGregoria, et al. "Test Results of an Active Magnetic Regenerative Refrigerator," Advances in Cryogenic Engineering, Band 37B, 1991, beschrieben. Dem Artikel von A.J. DeGregoria, Advances in Cryogenic Engineering, Band 37B, 1991, entnimmt man ein detailliertes Modell des aktiven magnetischen Regenerators.

[0003] Ein aktiver magnetischer Regenerator ist eine Art Kühlvorrichtung bzw. Wärmepumpe, die den magnetokalorischen Effekt ausnutzt. Den magnetokalorischen Effekt aufweisende Materialien wärmen sich bei Magnetisierung auf und kühlen bei Entmagnetisierung ab, bzw. umgekehrt. Bei einer grundlegenden aktiven magnetischen Regenerator-Vorrichtung (AMR-Vorrichtung) liegt ein Bett aus einem gegenüber einem Wärmeübertragungsfluid durchlässigen magnetischen Material zwischen zwei Wärmetauschern, wobei ein Mechanismus zum Bewirken eines Hin- und Herfließens von Fluid durch das Bett aus magnetischem Material von einem Wärmetauscher zum anderen vorgesehen wird. Außerdem wird ein Mechanismus zum Magnetisieren bzw. Entmagnetisieren des Bettes vorgesehen.

[0004] Ein AMR-Zyklus umfasst vier Teile: Bettmagnetisierung zum Aufwärmen des magnetischen Materials und des im Bett befindlichen Fluids über den magnetokalorischen Effekt; Fluidfluss von der kalten zur warmen Seite durch das Bett bei Abgabe von Wärme über einen Wärmetauscher an der warmen Seite; Bettentmagnetisierung, wobei das magnetische Material und das im Bett befindliche Fluid abgekühlt werden; sowie Fluidfluss von der warmen zur kalten Seite durch das Bett, wobei das gekühlte Fluid Wärme am Wärmetauscher an der kalten Seite absorbiert.

[0005] Eine AMR-Vorrichtung stellt eine Erweiterung des Regeneratorkonzepts dar. Einen Regenerator setzt man ein, um bei einem Austausch von Fluid hin und her zwischen zwei Speichern unterschiedli-

cher Temperaturen Wärme zurückzugewinnen. Der Regenerationszyklus umfasst zwei Teile: Strömen vom Kältespeicher durch das Bett zum Wärmespeicher, und anschließend ein Strömen durch das Bett vom Wärme- zum Kältespeicher.

[0006] Bei einer Regeneratorvorrichtung bezeichnet man die Gesamtfluidmasse, die vor der Umkehr in die eine Richtung fließt, als Shuttlefluid. Nach einem vielfachen Hin- und Herströmen des Shuttlefluids durch das Bett stellt sich bei dem Bettmaterial ein Temperaturverlauf ein, der von der Seite (der Kälteseite), an der das Kältefluid einströmt, zu der Seite (der Wärmeseite), an der das Wärmefluid einströmt, zunimmt. Beim Strömen von der Kälte- zur Wärmeseite strömt das Fluid bei einer Temperatur T_c , der Temperatur des Fluids im Speicher an der Kälteseite, ein. Beim Durchqueren des Bettes wird das Shuttlefluid erwärmt und es verlässt das Bett bei einer unterhalb von T_h liegenden Temperatur, der Temperatur im Speicher an der Wärmeseite. Beim Strömen von der Wärme- zur Kälteseite strömt das Fluid bei der Temperatur T_h in das Bett und wird beim Durchqueren des Bettes abgekühlt. Es verlässt das Bett bei einer über T_c liegenden Temperatur. Theoretisch erhält das Bett über den gesamten Zyklus keine Nettowärme. Es dient als Zwischenwärmespeicher, der Wärme von dem Wärmefluid aufnimmt und sie an das Kältefluid abgibt. Der Temperaturunterschied Δt zwischen der beim Einströmen des Shuttlefluids in den Kältespeicher herrschenden Temperatur und der Temperatur T_c des Kältespeicherfluids stellt einen Wärmefluss vom Wärme- zum Kältespeicher dar. Schlimmstenfalls beträgt dieser Unterschied $T_h - T_c$, was bei dem Fall zutrifft, in dem kein Regenerator vorhanden ist. Das Verhältnis Δt zu $(T_h - T_c)$ bezeichnet man als Regeneratorwirkungslosigkeit.

[0007] Eine AMR-Vorrichtung magnetisiert und erwärmt das Bett vor dem Fluidfluss von kalt auf warm, um sodann das Bett vor dem Strömen von der Wärme- zur Kälteseite zu entmagnetisieren und abzukühlen. Das Anlegen des magnetischen Feldes an das magnetische Bett erzeugt ein Paar Temperaturverläufe und relativer Lagen im Bett, und zwar einen bei Magnetisieren und einen bei Entmagnetisieren des Bettes. Als adiabatischen Temperaturwechsel des magnetischen Materials beim Wechsel im magnetischen Feld bezeichnet man den Unterschied zwischen den zwei Bettverläufen an beliebiger Lage. Ist der adiabatische Temperaturwechsel groß genug, kann das von der Kälteseite des Bettes ausströmende Fluid eine Temperatur aufweisen, die niedriger als die Temperatur des Kältespeichers ist, was anstatt zu einem Wärmeleck von dem Wärme- zum Kältespeicher, was bei einem normalen Regenerator der Fall wäre, zu einem Nettoabkühlen des Kältespeichers führt. Gemäß den Gesetzen der Thermodynamik muss dabei natürlich Arbeit verrichtet werden, da Wärme von einem Kälte- zu einem Wärmespeicher fließt. Bei einem AMR er-

folgt die Arbeit durch den Antriebsmechanismus, der den Magnet und/oder das Bett relativ zueinander bewegt, oder durch den Einsatz eines rotierenden Permanentmagnets bzw. eines elektrisch geschalteten Magnets. Durch Einsatz der Wärmetauscher sowohl an der Wärme- als auch an der Kälteseite kann die Wärme über den AMR von dem Wärmetauscher an der Kälteseite entzogen und über den Wärmetauscher an der Wärmeseite abgegeben werden. Ein Aufbau zum Erzielen dieser Übertragung wird in der oben genannten US-Patentschrift 4 332 135 offenbart.

[0008] Der oben beschriebene AMR-Zyklus ist dem Brayton-Zyklus für eine Gaskühlvorrichtung ähnlich, in dem die Magnetisierungs- und Entmagnetisierungs-(Arbeitseingabe)-Teile des Zyklus bei konstanter Entropie, also ohne Fluidströmen bzw. Wärmeübertragung, durchgeführt werden. Bei einem magnetischen Zyklus analog dem Ericsson-Zyklus erfolgt der Wechsel im Feld bei einer konstanten Bettmaterialtemperatur, was eine Wärmeübertragung während der Magnetisierungs- und Entmagnetisierungsverfahren erforderlich macht. Es können auch zwischen den Brayton- und Ericsson-Zyklen angesiedelte Zyklen durchgeführt werden, die durch einen Wärmeübertragungsbetrag bei der Magnetisierung gekennzeichnet werden, der zwischen den von den Brayton- bzw. Ericsson-Zyklen erforderlichen Beträgen liegt. Durch Ermöglichen eines Teilfluidflusses im Bettmaterial während des Magnetisierungs- und Entmagnetisierungsvorgangs können Ericsson-analoge AMR-Zyklen und dazwischen liegende Zyklen durchgeführt werden.

[0009] Eine weitere Erweiterung aktiver magnetischen Regeneratoren entnimmt man der US-Patentschrift Nr. 5 249 424 für DeGregoria, et al., in der der Fluss von Wärmeübertragungsfluid durch das Bett ungleichmäßig ist, so dass mehr Fluid durch das Bett von der Wärme- zur Kälteseite des Betts als von der Kälte- zur Wärmeseite fließt. Das überflüssige Wärmeübertragungsfluid wird wieder zur Wärmeseite des Betts umgelenkt, und es können mehrere Stufen von aktiven magnetischen Regeneratoren eingesetzt werden. Wie in diesem Patent beschrieben können die Regeneratorbetten entweder wiederholt in die Magnetfelder hinein und aus den Magnetfeldern herausbewegt werden oder die Betten können auf einem Drehrad montiert werden.

[0010] Einer der Nachteile von aktiven magnetischen Regeneratoren ist die mangelnde Effizienz, die sich ergibt, weil bei sich hin- und herbewegenden aktiven magnetischen Regeneratoren das Wärmeübertragungsfluid zwischen dem Regeneratorbett bzw. den Regeneratorbetten und den jeweiligen warmen und kalten Wärmetauschern hin und her geleitet wird. Da der Fluidfluss nicht in einer einzigen Richtung zwischen den Betten und den Wärmetauschern stattfindet,

befindet sich ein Teil des Wärmetauscherfluids immer in den Verbindungsleitungen zwischen den Betten und den Wärmetauschern und bewegt sich nie zyklisch durch die Betten und die Wärmetauscher. Dieses zurückgehaltene Wärmeübertragungsfluid, üblicherweise als „Totvolumen“ bezeichnet, stellt eine wesentliche Ursache der Wirkungslosigkeit bei vorbekannten aktiven magnetischen Regeneratoren dar.

[0011] Bei herkömmlichen Gaszyklenregeneratoren sind viele der häufigsten und wirtschaftlich am geeignetsten Kältemittel wie z.B. Fluorochlorkohlenwasserstoffe umweltgefährdend. Bei magnetischen Kühlvorrichtungen mit aktiven magnetischen Regeneratoren ist das Arbeitsmaterial ein Feststoff, und es wird ein separates Fluid zur Übertragung von Wärme zu und von den Wärmetauschern eingesetzt. Da das Wärmeübertragungsfluid keiner Kompression bzw. Expansion unterzogen werden muss, kann jedes Fluid mit annehmbarer Wärmekapazität und ausreichenden Fließeigenschaften über den Temperaturbereich der Kühlvorrichtung eingesetzt werden.

[0012] In US-4 507 928 wird ein Verfahren und eine Vorrichtung für ein auf dem Carnot-Zyklus basierendes magnetisches Kühlsystem vorgestellt. Eine sich kontinuierlich hin und her bewegende Verdrängungsvorrichtung nimmt mindestens ein Paar paramagnetischer Stoffe auf, wobei jeder alternierend in das magnetische Feld hinein- und aus dem magnetischen Feld herausgetrieben wird. Zum Erzeugen von Wärmetauscherbedingungen bei zwei separaten Extremtemperaturwerten lassen zwei getrennte bidirektionale Pumpsysteme Heliumgas durch die Verdrängungsvorrichtung und durch beide paramagnetische Stoffe hindurch fließen.

ZUSAMMENFASSENDE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0013] Erfindungsgemäß wird eine aktive magnetische Kühlvorrichtung vorgesehen, welche umfasst: (a) einen ein Magnetfeld erzeugenden Magnet; (b) ein Bett, welches ein den magnetokalorischen Effekt aufweisendes Material umfasst, das porös ist und das Strömen von Wärmeübertragungsfluid durch dieses magnetokalorische Material zulässt, und (c) einen Hubkolbenantrieb, gekennzeichnet durch: (d) ein Verteilungsventil mit einem ersten Ventilelement und einem sich bewegenden zweiten Ventilelement, welche gleitend miteinander in Eingriff stehen, wobei das erste Ventilelement und das sich bewegende zweite Ventilelement jeweils Anschlüsse aufweisen, durch welche dem Ventilelement Wärmeübertragungsfluid zugeführt und von diesem aufgenommen werden kann; (e) wobei das Bett ein magnetisches Regeneratorbett ist, welches an dem sich bewegenden zweiten Ventilelement angebracht ist, um sich mit diesem zu bewegen, wobei das sich bewegende zweite Ven-

tilelement einen in eine erste Seite des Betts mündenden Anschluss sowie einen in eine zweite Seite des Betts mündenden Anschluss aufweist, so dass zwischen den Anschlüssen strömendes Fluid durch das magnetokalorische Material des Betts strömt; (f) wobei der Hubkolbenantrieb mit dem sich bewegenden zweiten Ventilelement verbunden ist, um das sich bewegende zweite Ventilelement und das daran angebrachte Regeneratorbett zwischen einer ersten Position, in welcher sich das Regeneratorbett außerhalb des Magnetfelds des Magnets befindet, und einer zweiten Position, in welcher sich das Regeneratorbett in dem Magnetfeld des Magnets befindet, zu verschieben; (g) einen heißen Wärmetauscher; (h) einen kalten Wärmetauscher; (i) Rohrleitungen, welche mit den Anschlüssen des ersten Ventilelements und mit dem heißen und dem kalten Wärmetauscher verbunden sind, wobei die Rohrleitungen Wärmeübertragungsfluid in einem Kreislauf leiten, wobei der Kreislauf vom Bett über das Verteilungsventil bis zu dem kalten Wärmetauscher und dann zurück über das Verteilungsventil umfasst, wenn sich das Bett außerhalb des Magnetfelds befindet, und der Kreislauf vom Bett über das Verteilungsventil bis zu dem heißen Wärmetauscher und dann zurück über das Verteilungsventil umfasst, wenn sich das Bett in dem Magnetfeld befindet, das Verteilungsventil das Strömen durch diese so leitet, so dass der Strömungskreislauf durch die Rohrleitungen in beiden Positionen des Verteilungsventils in gleicher Richtung gewahrt wird, und wobei die Richtung des Strömens durch das Bett in jeder Position des Ventils umgekehrt ist; und (j) eine Pumpe, welche in den Rohrleitungen zum Fördern von Wärmeübertragungsfluid durch den heißen und den kalten Wärmetauscher, die Rohrleitungen und das Verteilungsventil verbunden ist.

[0014] Die im Folgenden beschriebene aktive magnetische Regeneratorkühlvorrichtung umfasst ein sich hin und her bewegendes Bett und ein Verteilungsventil für Wärmeübertragungsfluid, das bei Bewegen des Regeneratorbetts zwischen einer Stellung, in der sich das Bett innerhalb des magnetischen Felds eines Magnets, und einer Stellung, in der es sich außerhalb des magnetischen Felds des Magnets befindet, betätigt wird. Das Verteilungsventil weist ein normalerweise ortsfestes erstes Ventilelement sowie ein sich bewegendes zweites Ventilelement auf, welche gleitend miteinander in Eingriff stehen, wobei jedes Ventilelement Anschlüsse aufweist, durch welche dem Ventilelement Wärmeübertragungsfluid zugeführt und von diesem aufgenommen werden kann. Dabei ist das Bett so an dem sich bewegenden zweiten Ventilelement angebracht, und zwar in Verbindung mit den Anschlüssen in dem sich bewegenden zweiten Ventilelement, dass das Wärmeübertragungsfluid in einer einzigen Richtung in und durch das Ventil gefördert wird und aus dem Ventil direkt ins Regeneratorbett durch die Anschlüsse in dem sich bewegenden zweiten Ventilelement austritt.

In beiden Bettpositionen bleibt die Richtung des Fluidstroms zum, aus und durch das Ventil gleich, wobei das Ventil die Richtung des Fluidstroms durch das Bett in der magnetisierten und entmagnetisierten Position des Betts umschaltet. Dadurch wird die Effizienz der erfindungsgemäßen Regeneratorkühlvorrichtung deutlich erhöht, weil es im Wesentlichen kein Totvolumen des Wärmeübertragungsfluids gibt.

[0015] Vorzugsweise umfasst die erfindungsgemäße aktive magnetische Regeneratorkühlvorrichtung warme und kalte Wärmetauscher, Rohrleitungen, welche die warmen und kalten Wärmetauscher mit dem Verteilungsventil verbinden, an dem das Regeneratorbett angebracht wird, und eine Pumpe zum Fördern des Wärmeübertragungsfluids durch die Wärmetauscher und zu und von dem Ventil. Zum Antreiben des Ventils zwischen seinen zwei Stellungen und zum Bewegen des Regeneratorbetts zwischen seinen zwei Stellungen wird ein Hubkolbenantrieb wie z.B. ein Kolben-Druckluftzylinder mit dem Verteilungsventil verbunden. Vorzugsweise sind zwei Regeneratorbetten an dem Verteilungsventil angebracht, so dass ein Bett an jeder Endstellung des Ventils in dem Feld des Magnets liegt, während das andere Bett außerhalb des Magnetfelds liegt. Gegebenenfalls kann die Vorrichtung mehr Betten umfassen, die gemeinsam bewegt werden, beispielsweise vier Betten und zwei Magneten (pro Magnet zwei Betten), was zu einer damit einhergehenden Zunahme der Kühlleistung führt. Das Verteilungsventil schaltet die Richtung des Fluidstroms durch das Bett bzw. die Betten dergestalt, dass das durch das im magnetischen Feld befindliche Bett geströmte Wärmeübertragungsfluid zunächst durch den warmen Wärmetauscher hindurch und von dort zu dem im magnetischen Feld befindlichen Bett fließt. Durch das Verteilungsventil wird das durch das außerhalb des magnetischen Felds liegende Bett strömende Fluid zum kalten Wärmetauscher und von dort zurück zu dem im magnetischen Feld liegenden Bett geleitet. Zum Aufrechterhalten des Strömens in einem ständigen Kreislauf durch die unterschiedlichen Bestandteile der Vorrichtung wird die Pumpe in den Rohrleitungen angeschlossen. Werden die Betten zwischen ihren zwei Stellungen bewegt, ist die Pumpe vorzugsweise ausgeschaltet bzw. wird umgangen, so dass kein Fluid fließt, bis sich die Betten in ihren Endstellungen (bei einem Zyklus der Brayton-Art) befinden, woraufhin das Verteilungsventil die Strömungsrichtung des Fluids durch das jeweilige Bett bei gleichzeitigem Beibehalten des Strömens des Wärmeübertragungsfluids in eine Richtung an jeder Stelle außerhalb der Betten ändert, um das Totvolumen des Wärmeübertragungsfluids zu minimieren. In einigen Fällen kann es wünschenswert sein, einen zwischen den Brayton- und den Ericsson-Zyklen liegenden Zyklus durchzuführen, der ein Strömen von Wärmeübertragungsfluid während der Anfangs- bzw. Endabschnitte des Entmagnetisierungs- bzw. Magnetisierungsvor-

gangs erforderlich macht. Das kann erreicht werden, indem man die Anschlüsse im normalerweise ortsfesten Ventilelement und in dem sich bewegenden zweiten Ventilelement immer zu einander ausgerichtet hält, indem das erste Ventilelement eine begrenzte Strecke lang der Bewegung des zweiten Ventilelements folgen darf.

[0016] Das selbsttätig aktivierende Verteilungsventil kann umfassen: ein sich bewegendes zweites Ventilelement, das aus einem Außenrohr gebildet wird, auf dem an von einander beabstandeten Stellen die zwei Regeneratorbetten angebracht sind, sowie ein erstes Element, das aus einem Innenrohr mit einem Durchmesser gebildet wird, der kleiner als der Innendurchmesser des Außenrohrs ist, diesem jedoch sehr nahe kommt. Der Hubkolbenantrieb ist mit dem Außenrohr verbunden, um es in eine Hin- bzw. Herbewegung zu versetzen. Das Innenrohr weist ein durch Wandungen in vier Viertelkreisrohrleitungen (bei zwei Betten; bei einem Bett können zwei halbe Rohrleitungen eingesetzt werden) unterteiltes Hohlumen auf, und die vier Viertelkreisrohrleitungen stehen mit vier Anschlüssen des ersten Ventilelements in Verbindung. Zur Zufuhr von Wärmeübertragungsfluid zu jeder der vier Viertelkreisrohrleitungen des Innenrohrs bzw. zur Aufnahme von Wärmeübertragungsfluid von diesen werden die sich zu den Wärmetauschern und zur Pumpe erstreckenden Außenrohrleitungen mit diesen Anschlüssen verbunden. Die zylindrische Wand des Innenrohrs weist darin beabstandete Öffnungspaare auf, die mit jeweiligen Öffnungen der vier Viertelkreisrohrleitungen, in die das Lumen des Innenrohrs unterteilt wird, in Verbindung stehen. Bei zwei Betten befinden sich im Innenrohr drei Paar gleichmäßig beabstandeter Öffnungen, wobei die drei Paar Öffnungen an Verweilstellen der Betten liegen. Zwei der Öffnungspaare befinden sich an außerhalb des Magnetfelds des Magnets liegenden Stellen, und die Öffnungen eines der Paare befinden sich innerhalb des Magnetfelds des Magnets. Das Außenrohr weist darin durch die Wand des Rohrs hin zu einem vorzugsweise als zylindrisches, an dem Außenrohr montiertes Gehäuse ausgebildeten Bett verlaufende Anschlusspaare auf. Das Gehäuse wird mit dem den magnetokalorischen Effekt aufweisenden Material gefüllt, wobei sich die in dem Außenrohr liegenden Anschlüsse an Stellen nahe den für die Betten vorgesehenen zylindrischen Gehäusen bis zum Regeneratorbett erstrecken. Zur Verhinderung eines Strömens von Wärmeübertragungsfluid von den Betten bzw. zu diesen – außer wenn die in dem Außenrohr befindlichen Öffnungen mit den in dem Innenrohr befindlichen Öffnungen ausgerichtet sind – greifen zwischen dem Innen- und Außenrohr Dichtungen. Diese Dichtungen können als sich zwischen dem Innen- und Außenrohr erstreckende Ringe ausgebildet werden, was einfache, widerstandsfähige und zuverlässige Gleitdichtungen ergibt.

[0017] Vorzugsweise münden die zwei Paar Öffnungen im normalerweise ortsfesten Innenrohr, die an Stellen außerhalb des Magnetfelds des Magnets liegen, in dieselben zwei Viertelkreisrohrleitungen des Lumens. Diese zwei Rohrleitungen erstrecken sich bis zu zwei Anschlüssen des ersten Ventilelements. Zur Bereitstellung von Wärmeübertragungsfluid über eine Strecke vom Bett über die Rohrleitung bis zum kalten Wärmetauscher erstreckt sich eine Rohrleitung von einem dieser Anschlüsse bis zum kalten Wärmetauscher, während der andere dieser Anschlüsse zur Zufuhr von Fluid vom warmen Wärmetauscher über die Rohrleitung bzw. die Viertelkreisrohrleitung zum Bett über eine Rohrleitung mit dem warmen Wärmetauscher verbunden ist. Die anderen innerhalb des Magnetfelds liegenden, im Innenrohr befindlichen zwei Paar Öffnungen münden in die andere zwei Viertelkreisrohrleitungen, wobei sich eine der Viertelkreisrohrleitungen bis zu einem mit einer Rohrleitung verbundenen Anschluss erstreckt, um Wärmeübertragungsfluid vom Bett zu dem warmen Wärmetauscher zu liefern, wenn sich das Bett innerhalb des Magnetfelds befindet, und sich die andere Viertelkreisrohrleitung zur Aufnahme von Fluid von dem kalten Wärmetauscher zu einem mit einer Rohrleitung verbundenen Anschluss erstreckt. Auf diese Weise erhält das innerhalb des Magnetfelds gelegene Bett Wärmeübertragungsfluid von dem kalten Wärmetauscher, das in eine Richtung durch das Bett hindurchströmt, über die andere Öffnung hinaus in das Außenrohr geleitet wird, und von dort über eine Viertelkreisrohrleitung, aus einem Anschluss des ersten Ventilelements und über eine Außenrohrleitung zum warmen Wärmetauscher geleitet wird.

[0018] Das in dem Regeneratorbett gelegene Material weist den magnetokalorischen Effekt auf. Die Temperatur des im Bett befindlichen Materials erhöht sich somit, wenn es in das Magnetfeld gelangt. Das durch das im Magnetfeld befindliche Bett strömende Wärmeübertragungsfluid nimmt Wärme von dem Regeneratorbettenmaterial auf, diese Wärme wird über das Wärmeübertragungsfluid an den warmen Wärmetauscher übertragen, und der warme Wärmetauscher entzieht diesem Fluid Wärme, so dass das aus dem warmen Wärmetauscher austretende Fluid eine niedrigere Temperatur aufweist. Bei Herausbewegen aus dem Magnetfeld fällt die Temperatur des magnetokalorischen Materials in dem außerhalb des Magnetfelds befindlichen Bett. Es nimmt Wärmeübertragungsfluid bei einer Temperatur, die zu diesem Zeitpunkt höher als die Temperatur des Regeneratorbetts ist, von dem warmen Wärmetauscher auf. Somit nimmt das Regeneratorbett Wärme von dem Wärmeübertragungsfluid auf, und das aus dem Bett austretende Fluid weist eine niedrigere Temperatur als das in das Bett eindringende Fluid auf. Dieses Fluid fließt dann aus dem Verteilungsventil heraus und in den kalten Wärmetauscher hinein, wo das Wärmeübertragungsfluid Wärme von dem zu kühlen-

den Material aufnimmt (z.B. der Innenseite einer Kühlvorrichtung zur Kaltlagerung), und wärmer wird. Nunmehr strömt das aus dem kalten Wärmetauscher austretende Wärmeübertragungsfluid über eine Rohrleitung zurück zu einem Anschluss des Verteilungsventils, an welcher Stelle es über eine Viertelkreisrohrleitung in dem Verteilungsventil zum in dem Magnetfeld liegenden Regeneratorbett geleitet wird, wobei dieses Wärmeübertragungsfluid beim Durchströmen des Betts somit Wärme von dem Regeneratorbett aufnimmt.

[0019] Wenn das Wärmeübertragungsfluid durch die zwei Betten strömt, sinkt die Temperatur des magnetokalorischen Materials in dem im Magnetfeld liegenden Bett (bei Beibehalten eines Temperaturverlaufs: ansteigend von der Einlass- zur Auslassseite des Betts), und die Temperatur des magnetokalorischen Materials in dem im Magnetfeld liegenden Bettes (bei Beibehalten eines Temperaturverlaufs: absteigend von der Einlass- zur Auslassseite des Betts) steigt.

[0020] Zum Verrichten der zum Erreichen der Kühlung erforderlichen Arbeit bewegt der Hubkolbentrieb dann das Verteilungsventil und die Betten nach einer ausgewählten Verweilzeit in einer Endlage in die gegenüberliegende Endlage, so dass das eine Bett, das sich in dem Magnetfeld befand, außerhalb des Magnetfelds liegt und das andere Bett, das sich außerhalb des Magnetfelds befand, in dem Magnetfeld liegt. Nunmehr führt das Verteilungsventil den Regeneratorbetten wieder Fluid zu, und zwar bei Fluidstromrichtungen, welche den Fluidstromrichtungen durch die Betten in ihren vorherigen Stellungen entgegengesetzt sind, um den Temperaturverlauf innerhalb der Betten beizubehalten und um eine Regenerationswirkung zu erzielen. Bei Herausbewegung aus dem Magnetfeld sank die Temperatur des magnetokalorischen Materials in dem im Magnetfeld liegenden Betts. Dieses Bett nimmt nun Wärmeübertragungsfluid von dem warmen Wärmetauscher auf; dieses Fluid tritt an der Seite des Betts ein, die die höchste Temperatur aufweist, und tritt an der Seite des Betts aus, die die niedrigste Temperatur aufweist. Während ein Temperaturverlauf von einem Ende des Bettes zum anderen Ende bei Bewegen des Bettes von einer Position im Magnetfeld zu einer Position außerhalb des Magnetfelds beibehalten wird, sinkt die Temperatur des magnetokalorischen Materials an allen Stellen innerhalb des Betts. In ähnlicher Weise wird der Temperaturverlauf zwischen den zwei Enden des Betts beibehalten, wenn das Bett von einer Stelle außerhalb des Magnetfelds zu einer Stelle im Magnetfeld bewegt wird, doch wird die Temperatur des Materials an allen Stellen im Bett angehoben.

[0021] Vorzugsweise ist der Magnet als Solenoidmagnet mit einer mit dem ersten Ventilelement und dem beweglichen zweiten Ventilelement des Vertei-

lungsventils ausgerichteten zylindrischen Innenseite ausgeführt. Der Magnet kann ein mit einer elektrischen Quelle verbundener Elektromagnet, ein in einem Dewar-Gefäß und ggf. in einem Flüssigkühlmittelbad gehaltener supraleitender Magnet oder ein starker Dauermagnet sein.

[0022] Für den Betrieb der vorliegenden Erfindung bei oder nahe Raumtemperatur – z.B. zum Betreiben einer Kühlvorrichtung, die das Innere einer Kühlvorrichtung bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt hält – kann das Wärmeübertragungsfluid aus Wasser oder Mischungen aus Wasser und Gefrierschutzmittel bestehen. Höchst wünschenswert ist die Verwendung von Wasser, einer gepufferten Wasserlösung oder von Wasser-/Gefrierschutzmitteln als Wärmeübertragungsfluid, da derartige Materialien kostengünstig und leicht erhältlich sind und minimale Umweltgefahren darstellen.

[0023] Weitere Aufgaben, Merkmale und Vorteile der Erfindung gehen aus der folgenden eingehenden Beschreibung in Verbindung mit den beigefügten Zeichnungen hervor.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0024] Es zeigen:

[0025] [Fig. 1](#) eine vereinfachte schematische Darstellung der erfindungsgemäßen aktiven magnetischen regenerativen Kühlvorrichtung,

[0026] [Fig. 2](#) einen Fluidstrom, welcher ein die erfindungsgemäße Kühlvorrichtung enthaltendes Kühlsystem veranschaulicht,

[0027] [Fig. 2A](#) einen ein Kühlsystem veranschaulichenden Fluidstrom ähnlich dem vom [Fig. 2](#), aber so abgewandelt, dass ein Fluid von einer hohen zu einer niedrigen Temperatur abgekühlt wird,

[0028] [Fig. 3](#) eine veranschaulichende Darstellung des Betriebs des Verteilungsventils in Verbindung mit den warmen und kalten Wärmetauschern, die eine erste Endstellung des Verteilungsventils und der Regeneratorbetten zeigt,

[0029] [Fig. 4](#) eine Ansicht wie in [Fig. 3](#), die die zweite Endstellung des Verteilungsventils und der Regeneratorbetten zeigt,

[0030] [Fig. 5](#) eine Querschnitts-Ansicht des sich bewegenden zweiten Ventilelements des Verteilungsventils und der daran montierten magnetischen Regeneratorbetten,

[0031] [Fig. 6](#) eine Außenansicht des ersten Ventilelements des Verteilungsventils, und

[0032] [Fig. 7–Fig. 14](#) vereinfachte Darstellungen, die eine bevorzugte Ausführungsform des Innenrohrs unterteilten Lumens des ersten Ventilelements des Verteilungsventils zeigen.

EINGEHENDE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0033] Unter Bezugnahme auf die Zeichnungen wird in [Fig. 1](#) bei **20** eine grundsätzliche erfindungsgemäße magnetische regenerative Kühlvorrichtung gezeigt. Die Vorrichtung **20** umfasst einen aktiven magnetischen Regenerator **21**, an dem ein warmer Wärmetauscher **23**, ein kalter Wärmetauscher **24** und eine Pumpe **25** angeschlossen sind. Die Vorrichtung **20** entzieht einer Kühllast, z.B. einem Fluid oder einem geschlossenen Raum, mittels des kalten Wärmetauschers **24** Wärme und gibt mittels des warmen Wärmetauschers **23** Wärme von der Vorrichtung ab. Von dem aktiven Regenerator **21** strömt Wärmeübertragungsfluid bei einer hohen Temperatur über eine Rohrleitung **26**, z.B. ein Metallrohr, zu dem warmen Wärmetauscher **23**; sodann fließt das Fluid durch den warmen Wärmetauscher **23** (und die Temperatur wird folglich gesenkt) über eine Rohrleitung **27** zur Pumpe **25** und dann von der Pumpe über eine Rohrleitung **28** zurück zum aktiven Regenerator **21**. In ähnlicher Weise strömt Wärmeübertragungsfluid bei einer niedrigen Temperatur von dem aktiven Regenerator **21** über eine Rohrleitung **30** zu dem kalten Wärmetauscher **24**; das durch den kalten Wärmetauscher (und somit bei einer höheren Temperatur als das Fluid in der Rohrleitung **30**) geströmte Wärmeübertragungsfluid wird über eine Rohrleitung **31** zurück zum Regenerator **21** geführt. Grundsätzlich ist die Temperatur des in den Rohrleitungen **26**, **27** und **28** befindlichen Wärmeübertragungsfluids höher als die Umgebungstemperatur, so dass für diese Rohrleitungen keine Isolierung erforderlich wird. Dagegen liegt die Temperatur des in den Rohrleitungen **30** und **31** befindlichen Wärmeübertragungsfluids grundsätzlich niedriger als die Umgebungstemperatur, so dass eine Wärmeisolierung um diese Rohrleitungen zur Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads der Vorrichtung eingesetzt werden kann.

[0034] Das Magnetfeld für den aktiven magnetischen Regenerator **21** wird z.B. durch eine in der üblichen Art eines gewickelten Supraleiters wie z.B. Niobtitan oder Niobzinn gebildete Solenoidmagnetspule **34** gebildet. Zum Halten der Magnetspule **34** im supraleitenden Zustand wird die Spule in ein Bad **36** aus in üblicher Weise in einem Dewar-Gefäß **37** gehaltenem Flüssighelium bzw. Flüssigwasserstoff eingetaucht. Die Spule **34** kann auch mittels eines geeigneten Kryokühlers gekühlt werden. Derartige supraleitende Magneten sowie ihre dazugehörigen Dewar-Gefäße sind gut bekannt und werden bei einer Vielzahl von gewerblichen Anlagen wie z.B. Magnetresonanzabbildungsvorrichtungen eingesetzt.

Das Dewar-Gefäß **37** weist eine durch die Mitte des Dewar-Gefäßes verlaufende zylindrische Öffnung **38** auf, die durch eine zylindrische, isolierte Innenwand **39** gebildet wird. Die Magnetspule **34** erstreckt sich um die Wand **39** und schließt sich dieser eng an. Somit stellt die Spule **34** ein starkes Magnetfeld bereit, das durch das Innere der Magnetspule und so durch einen allgemein bei **40** angegebenen Abschnitt innerhalb der hohlen Mittelöffnung **38** des Dewar-Gefäßes verläuft.

[0035] Ein Bereich des Verteilungsventils **42** wird in der Mittelöffnung **38** positioniert. Das Ventil **42** weist ein erstes Ventilelement **43** sowie ein sich bewegendes zweites Ventilelement **44** auf, die gleitend miteinander greifen. Normalerweise wird das erste Ventilelement für einen Brayton-Kühlzyklus ortsfest gehalten, es kann jedoch so montiert werden, dass ein kleiner Bereich einer Gleitbewegung möglich ist, falls ein Zyklus zwischen einem Brayton- und einem Ericsson-Zyklus wünschenswert ist. An dem beweglichen zweiten Ventilelement **44** werde ein erstes Regeneratorbett **45** und ein zweites Regeneratorbett **46** montiert. Über eine Welle **47** wird das bewegliche zweite Ventilelement **44** des Verteilungsventils **42** an einem Antrieb **48** wie z.B. einem Druckluftzylinder angeschlossen, obwohl jeder geeignete Antrieb wie z.B. ein Hydraulikzylinder, Elektromotor usw. eingesetzt werden kann. Der Antrieb **48** arbeitet, um die Stellungen des Verteilungsventils **42** hin und her zu bewegen und umzuschalten sowie um die Betten **45** und **46** zwischen zwei Endstellungen zu bewegen. In der in [Fig. 1](#) gezeigten Endstellung liegt das erste bzw. obere Bett **45** innerhalb des Raums **40** in dem Magnetfeld des Solenoids **34**, während das zweite oder untere Bett **45** deutlich außerhalb des Magnetfelds des Solenoids liegt. In der zweiten Stellung werden das bewegliche zweite Ventilelement **44** und die Betten **45** bzw. **46** so durch den Antrieb **48** nach oben gezogen, dass das zweite Bett **46** in dem Raum **40** innerhalb des Magnetfelds des Solenoids **34** liegt, während das erste Bett **45** über das Solenoid **34** gehoben wird und außerhalb seines Magnetfelds liegt. An seiner Unterseite wird das erste Ventilelement **43** des Verteilungsventils **42** mit einem Verteilerrohr **49** verbunden, an dem die Rohrleitungen **26**, **28**, **30** und **31** angeschlossen sind. Zur Veranschaulichung werden das Dewar-Gefäß **37** und der darauf gelagerte Antrieb **48** gezeigt, die auf Beinen **51** montiert sind, die an einer mit Rädern ausgestatteten Mobilplattform **52** angebracht sind. An der Plattform **52** ist das Verteilerrohr **49** befestigt. Es ist jedoch selbstverständlich, dass der aktive Regenerator **21** direkt an einem massiven Boden bzw. an jeder anderen geeigneten Fläche montiert werden kann, und dass das Verteilungsventil **42** und der Antrieb **48** anders als vertikal, z.B. horizontal, ausgerichtet werden können, und zwar bei Bedarf mit entsprechenden Gleitaufnahmen und -trägern für das Ventil.

[0036] Es versteht sich auch, dass das zum Erzeugen des Magnetfelds eingesetzte supraleitende Solenoid **34** nur beispielhaft gezeigt wird, und dass die vorliegende Einrichtung mit anderen Magneten, z.B. mit elektrischem Strom versorgten Elektromagneten, oder Dauermagneten, eingesetzt werden, und dass entsprechende Hochtemperatur-Supraleitungssolenoiden bei Verfügbarkeit von praktischen Hochtemperatur-Supraleitungssolenoiden ebenfalls eingesetzt werden können. Der Einsatz eines supraleitenden Solenoids ist wünschenswert, sowohl um ein sehr starkes Magnetfeld innerhalb des Raums **40**, z.B. im Bereich von 1 Tesla bis 5 Tesla oder höher, zu erzeugen als auch weil zum Halten des Stromflusses im Solenoid und somit zum Erhalten des Magnetfelds nach dem Aufladen des Solenoids nur sehr wenig Energiezufuhr erforderlich ist. Nichtsdestotrotz wird der Aufwand zum Wiederauffüllen des kryogenischen Kühlmittels **36** – z.B. Flüssighelium oder -wasserstoff bei Niedrigtemperatursupraleitern bzw. Flüssigstickstoff bei Hochtemperatursupraleitern – bei gleichzeitig geringer Abnahme des Gesamtwirkungsgrads durch den hohen Wirkungsgrad des Kühlverfahrens ausgeglichen, in dem der aktive Regenerator **21** mit einem starken Dauermagnet eingesetzt wird. Bei nichtgewerblichen Anwendungsarten eignet sich ein Dauermagnet im Vergleich mit dem supraleitenden Solenoid **34** gut zur Erzeugung des Magnetfelds, und zwar bei einem entsprechenden etwas geringeren Kühlwirkungsgrad pro Zyklus der Betten **45** bzw. **46** in das Magnetfeld hinein und aus diesem heraus – d.h. es werden mehr Zyklen der Betten in das Feld hinein und aus diesem heraus erforderlich, um mit einem schwächeren Feldmagnet dieselbe Kühlleistung wie mit einem stärkeren Feldmagnet zu erzielen.

[0037] In einem schematischen Flussdiagramm wird in [Fig. 2](#) ein Beispiel für ein Kühlsystem gezeigt, mit dem die aktive magnetische regenerative Kühlvorrichtung eingesetzt werden kann. In [Fig. 2](#) wird ferner eine beispielhafte Steuervorrichtung **54** zur Steuerung der Betriebssequenz des Stroms des Wärmeübertragungsfluids durch die Vorrichtung und des Schaltens des Verteilungsventils **42** gezeigt. Die Steuervorrichtung **54** kann Signale z.B. von Endschaltern **55** bzw. **56** empfangen, die durch das sich bewegendes zweite Ventilelement **44** an den oberen bzw. unteren Endstellungen des Verteilungsventils **42** geschaltet werden. Über elektrische Leitungen **57** wird die Steuervorrichtung mit einem normalerweise geschlossenen magnetbetätigten Ventil **58** verbunden, das sich in der von der Pumpe **25** verlaufenden Leitung befindet, und wird über eine elektrische Versorgungsleitung **59** mit dem Magnet eines magnetbetätigten Bypass-Ventil **60** verbunden, das wiederum um die Pumpe **25** angeschlossen wird. Über eine elektrische Signalleitung **62** wird die Steuervorrichtung auch mit einem Ventil **63** verbunden, das die Luftzufuhr zum Antriebszylinder **48** steuert.

[0038] Über die von den Endschaltern **55** bzw. **56** empfangenen Signale bestimmt die Steuervorrichtung **54**, die als programmierbare Standardsteuervorrichtung, Relaisatz usw. ausgeführt werden kann, die Stellung des Verteilungsventils **42**. Erreicht das Ventil **42** eine seiner Endstellungen, liefert die Steuervorrichtung Signale zum Öffnen des Ventils **58** und zum Schließen des Bypass-Ventils **60**, wobei unter Druck von der Pumpe **25** zugeführtes Wärmeübertragungsfluid durch das Ventil **42** und von dort über eine kreisförmige Strecke durch den kalten Wärmetauscher **24** zum warmen Wärmetauscher **23** und von dort zurück zur Pumpe **25** geleitet wird. Nachdem sich das Verteilungsventil **42** eine vorbestimmte Zeit lang in seiner einen Endstellung befunden hat, liefert die Steuervorrichtung Signale an die Ventile **58** bzw. **60** zum Schließen des Ventils **58** bzw. zum Öffnen des Ventils **60**, und stoppt somit den Fluss des Wärmeübertragungsfluids zum Verteilungsventil **42**. Die Steuervorrichtung liefert dann auch ein Signal an der Leitung **62** zum Ventil **63**, um den Antriebszylinder **48** zu veranlassen, das Verteilungsventil **42** in seine andere Endstellung zu schalten. Erreicht das Ventil **42** seine andere Endstellung, liefert der entsprechende Endschalter der Endschalter **55** bzw. **56** ein Signal an die Steuervorrichtung, das angibt, dass die Endstellung erreicht wurde, und die Steuervorrichtung liefert dann Signale an die Ventile **58** bzw. **60** zum Öffnen des Ventils **58** bzw. zum Schließen des Ventils **60**, um wieder Wärmeübertragungsfluid durch das Verteilungsventil **42** zu dem kalten Wärmetauscher bzw. dem warmen Wärmeaustauscher zu liefern. Dieser Schaltzyklus des Ventils **42** wird dann kontinuierlich (bzw. bis zum Erreichen der gewünschten Temperatur der zu kühlenden Last) wiederholt. Je nach Betriebsart des Antriebs **48** kann die Steuervorrichtung ein Signal an das Ventil **63** liefern, um die Luftzufuhr zum Ventil **48** zu sperren. Alternativ kann der Antriebszylinder **48** so gewählt werden, dass der Zylinder zwischen festen Verfahrgrenzen der Kolbenstange des Antriebszylinders **48** arbeitet, wobei die Verfahrgrenzen des Zylinders mit den gewünschten Endstellungen des Verteilungsventils **42** übereinstimmen. Im letzteren Fall kann die Steuervorrichtung das Ventil **63** in der Schaltstellung halten, so dass Luft weiterhin unter Druck in die eine Richtung zum Antriebszylinder **48** geliefert wird, um den Zylinder in seiner Endstellung zu halten, bis das Ventil **42** zu schalten ist, woraufhin die Steuervorrichtung die Luftzufuhr zum Zylinder **48** zuschalten kann, um den Zylinder in seine andere Endstellung und das Verteilungsventil **42** in die gegenüberliegende Endstellung des Verteilungsventils **42** zu treiben.

[0039] Beim Brayton-Zyklus werden das Verteilungsventil **42** und das Pumpen-Bypassventil **60** eingesetzt, um sicherzustellen, dass bei dem Feldwechselteil des Zyklus kein Fluss erfolgt. Ist ein Zwischenzyklus zwischen dem Brayton- und dem Ericsson-Zyklus erwünscht, kann die Taktgebung des Vertei-

lungsventils bzw. des Bypassventils geändert werden, um einen Fluss während des Anfangs- bzw. Endteils der Bettbewegung zu ermöglichen. Zwei zum Ermöglichen eines solchen Flusses einsetzbare Abwandlungen sind: erstens die Verlängerung der Öffnungsschlitze in dem inneren ersten Ventilelement **43** des Verteilungsventils oder zweitens das Ermöglichen einer Bewegung des inneren ersten Ventilelements **43** über eine begrenzte Strecke zu Beginn der Bewegung des äußeren zweiten Ventilelements **44** des Ventils. Diese Bewegung kann durch die in den Dichtungen zwischen den innen und außen liegenden Ventilelemente vorliegende Reibung induziert werden; die Verschiebungsbewegung kann durch mechanische Anschläge begrenzt werden.

[0040] Die eingesetzten Kühlstoffe können so ausgewählt werden, dass sie dem ausgewählten Kühlzyklus optimal entsprechen. Vgl. z.B. C.R. Cross, et al., "Optimal Temperature – Entropy Curves For Magnetic Refrigeration," Adv. Cryogenic Engineering, R.W. Fast, Ed., Band 33, Plenum Press, 1988, S. 767–776.

[0041] Die aktive magnetische regenerative Kühlvorrichtung **20** kann in gewerblichen Kühlanwendungen z.B. zum Kühlen von Kaltlagerungsanlagen, Kühlräumen und so weiter eingesetzt werden. In diesem Fall kann der warme Wärmetauscher **23** ein für die Abgabe von Wärme an die Umgebungsluft geeigneter herkömmlicher Wärmetauscher der Abstrahlungsart sein. Der kalte Wärmetauscher **24** kann an einer Innenwand eines gekühlten Raums, z.B. eines Kühlraums, montierte Rohre umfassen, oder er kann als herkömmlicher Kühler zur Aufnahme von Wärme von der Umgebungsluft in einem gekühlten Raum ausgebildet werden.

[0042] Das Kühlsystem von [Fig. 2](#) ist so ausgeführt, dass es am kalten Wärmetauscher **24** Wärme bei einer kalten Temperatur aufnimmt und am warmen Wärmetauscher **23** Wärme bei einer hohen Temperatur abgibt. Zum Kühlen eines Fluids von einer warmen auf eine kalte Temperatur, kann das System aus [Fig. 2](#) wie in [Fig. 2A](#) gezeigt geändert werden. In der Anordnung der [Fig. 2A](#) wird das kalte Fluid an den Rohrleitungen **30** zu einem T-Verbindungsstück **65** geleitet, das den Fluidstrom so teilt, dass ein Teil zurück zum Verteilungsventil **42** an den Rohrleitungen **31** und ein Teil durch einen fluidkühlenden Wärmetauscher **24** fließt (der kalte Wärmetauscher **24** kann beispielsweise genutzt werden, um ihn durchfließendes Wasser zu kühlen). Das durch den kalten Wärmetauscher **24** strömende Fluid wird in einer Rohrleitung **66** über ein Flussteuerungsventil **67** zu einem mit der Rohrleitung **27** verbundenen Verbindungsstück **69** geleitet, um das Fluid von der Rohrleitung **66** zum Einlass der Pumpe **25** zu leiten. Das Fluid von der Rohrleitung **66** wird dann mittels der Pumpe **25** zurück zum Verteilungsventil **42** gefördert. Zum Kühlen eines Fluids hat diese Anordnung den Vorteil,

dass die erforderliche Arbeitsleistung verringert wird, da der Großteil der dem Fluid entzogenen Wärme nicht durch die volle Temperaturerhöhung getragen wird, die das gekühlte Fluid erfährt. Die Vorteile eines solchen ungleichmäßigen Strömens werden in der oben genannten US-Patentschrift 5 249 424 beschrieben.

[0043] In [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#), die die Stellungen der Regeneratorbetten **45** bzw. **46** in den zwei Endstellungen des Ventils **42** zeigen, wird die Wirkung des selbsttätigen Verteilungsventils **42** veranschaulicht. Die in [Fig. 3](#) gezeigte Stellung des Ventils **42** entspricht der in [Fig. 1](#) gezeigten Stellung des Ventils. In den [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) wird zur Veranschaulichung das Ventil **42**, das im Folgenden näher beschrieben wird, schematisch gezeigt. Das erste Ventilelement **43** des Verteilungsventils **42** weist ein inneres zylindrisches Rohr **75** auf, das ortsfest ist und über das Verteilungsrohr **49** mit den Rohrleitungen **26**, **28**, **30** und **31** verbunden ist, und das sich bewegende zweite Ventilelement **44** weist ein Außenrohr **76** auf, das um das Innenrohr **75** montiert wird und einen Innendurchmesser aufweist, der etwas größer als der Außendurchmesser des Innenrohrs **75** ist. Somit kann das Außenrohr **76** koaxial mit dem Innenrohr **75** sowie in engem Eingriff mit dem Innenrohr **75** gleiten. Das Außenrohr **76** des beweglichen Elements **44** ist mit der durch den Antrieb **48** hin und her zu bewegenden Welle **47** verbunden, wie in der [Fig. 1](#) dargestellt, und zwar bevorzugt durch Zwischensetzen eines Universalgelenks **78** zur Aufnahme etwaiger geringer Verschiebungen des Außenrohrs **76**, die unter Umständen erforderlich sind, damit es frei an dem Innenrohr **75** gleiten kann.

[0044] Vorzugsweise weist das Innenrohr **75** des ersten Ventilelements ein Hohlumen auf, das durch Wandungen **79** und **80** in vier in den [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) mit A, B, C bzw. D bezeichnete Viertelkreise geteilt wird, wobei jeder Viertelkreis eine axiale innere Rohrleitung des ersten Ventilelements darstellt. Dabei weist das Innenrohr **75** drei Paar Öffnungen auf, die in seiner Außenwand ausgebildet sind, und zwar ein erstes Paar **81** bzw. **82**, das an außerhalb der Position des Magnetfelds **40** in dem Magnet **34** liegenden Stellungen jeweils in die Viertelkreise A und C mündet; ein zweites Paar Öffnungen **83** bzw. **84**, die jeweils in die Viertelkreise A und C münden, die auch außerhalb des Bereichs **40** des Magnetfelds liegen; sowie ein drittes Paar Öffnungen **86** bzw. **87**, die in die Viertelkreise B bzw. D münden, wobei das dritte Paar Öffnungen **86** bzw. **87** innerhalb des Magnetfeldbereichs **40** des Magnets **34** liegt. Der Abstand zwischen den in jedem Paar vorhandenen Öffnungen ist für jedes Paar gleich. Obgleich dies in [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) nicht gezeigt wird, weist das Außenrohr **76** des beweglichen Elements Anschlusspaare auf, die durch die Wand des Außenrohrs verlaufen und in die Regeneratorbetten **45** bzw. **46** nahe der Enden der

Betten münden. Die Anschlüsse in der Außenwand sind bei einem Abstand von einer beabstandet, der dem Abstand zwischen den Öffnungspaaren **81–82**, **83–84** und **86–87** entspricht. In der in der [Fig. 3](#) gezeigten Stellung des Ventils sind die Anschlüsse im Regeneratorbett **46** mit den Öffnungen **86** bzw. **87** und die Anschlüsse im Regeneratorbett **46** mit den Öffnungen **81** bzw. **82** ausgerichtet. In diesen Stellungen kann das Wärmeübertragungsfluid frei durch diese Öffnungen von dem geteilten Lumen des Innenrohrs zu den Regeneratorbetten und wieder zurück durch die Öffnungen fließen. Analog dazu sind, wenn sich das Ventil **42** in der in [Fig. 4](#) gezeigten Stellung befindet, die Öffnungen **83** bzw. **84** mit den Anschlüssen in dem Regeneratorbett **45** und die Öffnungen **86** bzw. **87** sind mit den Anschlüssen im Regeneratorbett **46** ausgerichtet, wodurch ein freier Fluss von Wärmeübertragungsfluid durch diese Öffnungen in die Betten hinein und aus diesen heraus ermöglicht wird.

[0045] In der in [Fig. 3](#) gezeigten ersten Stellung des Ventils **42** wird Wärmeübertragungsfluid durch die Pumpe **25** durch die Rohrleitung **28** hindurch zur Rohrleitung des Viertelkreises C des Verteilungsventils und von dort aus der Öffnung **82** heraus in das Generatorbett gedrückt. Nachdem das Wärmeübertragungsfluid das Regeneratorbett **46** durchströmt hat, fließt es durch die Öffnung **81** hindurch in die Rohrleitung des Viertelkreises A und von dort aus dem Innenrohr **75** heraus über die Rohrleitung **30** zum kalten Wärmetauscher **24**. Da sich das Regeneratorbett **46** außerhalb des Felds des Magnets **34** in [Fig. 3](#) befindet, ist seine Temperatur gesunken, und das durch die Öffnung **81** von dem Bett **46** austretende Fluid weist eine niedrige Temperatur T_1 auf. Das bei einer Temperatur T_1 liegende Wärmeübertragungsfluid fließt durch den kalten Wärmetauscher **24**, nimmt Wärme auf und tritt bei einer höheren Temperatur T_2 an der Rohrleitung **31** aus. Das Fluid wird durch die Rohrleitung **31** zur Rohrleitung des Viertelkreises B des ersten Ventilelements geleitet und tritt durch die Öffnung **86** heraus in das Regeneratorbett **45**. Nachdem es durch das Bett **45** hindurch geströmt ist, tritt das Wärmeübertragungsfluid durch die Öffnung **87** hindurch zur Rohrleitung des Viertelkreises D heraus und strömt durch die Rohrleitung **26** aus dem ersten Ventilelement **42** zum warmen Wärmetauscher **23**. Da sich das Regeneratorbett **45** innerhalb des Magnetfelds des Magnets **34** befindet, ist die Temperatur des im Bett befindlichen magnetokalorischen Material gestiegen, und das durch das Bett **45** hindurch fließende Fluid nimmt Wärme auf. Somit liegt die Temperatur T_3 des durch die Öffnung **87** hindurch aus dem Bett **43** tretenden Fluids höher als die Temperatur T_2 , bei der das Fluid durch die Öffnung **86** hindurch in das Bett eindrang. Das bei der Temperatur T_3 liegenden Wärmeübertragungsfluid fließt durch den warmen Wärmetauscher **23**, verliert an Wärme und tritt bei einer niedrigeren Temperatur T_4 aus. Das

bei der Temperatur T_4 liegenden Fluid wird weiter an der Rohrleitung **27** über die Pumpe **25** und von dort an der Rohrleitung **28** zurück in die Rohrleitung des Viertelkreises C gefördert, wo das Fluid wieder durch die Öffnung **82** heraus in das Regeneratorbett **46** eindringt.

[0046] In der zweiten Stellung des Ventils **42**, wie in der [Fig. 4](#) gezeigt, wird Wärmeübertragungsfluid durch die Pumpe **25** durch die Rohrleitung **28** hindurch zur Rohrleitung des Viertelkreises C gefördert und dringt von dort durch die Öffnung **84** in das zu diesem Zeitpunkt außerhalb des Magnetfelds liegende Regeneratorbett **45** ein, so dass die Temperatur des innerhalb des Betts liegenden magnetokalorischen Materials gesunken ist. Das durch das Bett **45** hindurch tretende Wärmeübertragungsfluid verliert Wärme an das in dem Bett befindliche magnetokalorische Material, erfährt eine Temperaturreduzierung und dringt bei einer Temperatur T_1 durch die Öffnung **83** hinaus in die Rohrleitung des Viertelkreises A. Das Fluid tritt aus der Rohrleitung des Viertelkreises A aus und durch die Öffnung **30** hindurch zum kalten Wärmetauscher **24**, wo das Fluid Wärme aufnimmt und den Wärmetauscher bei einer Temperatur T_2 an der Rohrleitung **31** verlässt, von welcher es in die Rohrleitung des Viertelkreises B des ersten Ventilelements **43** einströmt. Das Fluid dringt aus der Rohrleitung des Viertelkreises B durch die Öffnung **86** hindurch in das magnetokalorische Material des Regeneratorbetts **46** ein, welches, da es sich in dem Magnetfeld des Magnets **34** befindet, eine Temperaturerhöhung erfahren hat. Das durch das Bett **46** hindurch tretende Wärmeübertragungsfluid nimmt somit Wärme von dem magnetokalorischen Material auf, erfährt eine Temperaturerhöhung und tritt durch die Öffnung **87** bei einer Temperatur T_3 aus, die höher als die Eingangstemperatur T_2 ist. Das durch die Öffnung **87** in die Rohrleitung des Viertelkreises D hinausströmende Fluid tritt durch die Rohrleitung **26** hindurch und dann durch den warmen Wärmetauscher **23**, wo es Wärme abgibt und bei einer Temperatur T_4 austritt, die niedriger als die Temperatur T_3 ist. Dieses Fluid wird dann an die Rohrleitung **27** zur Pumpe **25** gefördert, bei der es in die Rohrleitung **28** und von dort zurück in die Rohrleitung des Viertelkreises C des ersten Ventilelements **43** getrieben wird.

[0047] Zwischen dem Innenrohr **75** des ersten Ventilelements und der Innenseite des Außenrohrs **76** des beweglichen zweiten Ventilelements liegende Dichtungen dichten die Öffnungen **83** bzw. **84** in der in [Fig. 3](#) gezeigten Stellung des Ventils ab und dichten die Öffnungen **81** bzw. **82** in der in der [Fig. 4](#) gezeigten Stellung des Ventils **42** ab. Derartige Dichtungen verhindern auch, dass das aus den Öffnungen in dem Innenrohr in die Anschlüsse in den Regeneratorbetten **45** bzw. **46** austretende Fluid in den zwischen dem Innenrohr **75** und dem Außenrohr **76** liegenden Raum leckt. Wie oben erwähnt ist das magnetgesteu-

erte Ventil **58** beim Schalten des Ventils **42** vorzugsweise geschlossen und das Ventil **60** offen, so dass kein Wärmeübertragungsfluid durch das Ventil **42** fließt, wodurch die Möglichkeit eines Leckens von Wärmeübertragungsfluid weiter minimiert wird.

[0048] Das sich bewegende zweite Ventilelement **44** und die Regeneratorbetten **45** bzw. **46** sind in einer detaillierteren Querschnittsansicht in [Fig. 5](#) gezeigt. Wie dort veranschaulicht wird das Außenrohr **76** des beweglichen zweiten Ventilelements **44** als dünnwandiges Rohr z.B. aus Polyvinylchlorid oder einem sonstigen Kunststoff oder Epoxidglasfaser usw. ausgeführt. Vorzugsweise weist das Rohr **76** eine glatte zylindrische Innenfläche **90** auf, wobei bevorzugt ein Feststoffschmiermittel wie z.B. Grafit in die Wand eingearbeitet wird, das zum reibungslos gleitenden Eingriff mit der Außenfläche des stationären Innenrohrs **75** geeignet ist. Die Regeneratorbetten **45** bzw. **46** sind ähnlich aufgebaut und sind bei einem geeigneten Abstand voneinander an dem Außenrohr **76** des sich bewegenden zweiten Ventilelements **44** befestigt. Jedes der Regeneratorbetten **44** bzw. **46** weist ein aus einer zylindrischen Außenwand **92** und mit der Außenfläche des Außenrohrs **76** greifenden und daran z.B. mit Klebemittel befestigten Endwandungen **93** bestehendes Gehäuse auf. Die Wände **92** bzw. **93** können z.B. auch aus Kunststoff oder Epoxidglasfaser gebildet werden. Grundsätzlich sollten die eine Bewegung im Magnetfeld erfahrenden Teile aus Material gebildet werden, das minimale Wirbelstromverluste aufweist. Zusammen mit der Oberfläche **94** des Außenrohrs **76** begrenzen die zylindrische Außenwand **92** und die Endwandungen **93** ein ringförmiges Volumen, das mit porösem magnetokalorischem Material **95** bepackt wird. Das poröse magnetokalorische Material **95** kann in Form von kleinen zusammengepackten Körnern vorliegen, die Zwischenräume entstehen lassen, durch die das Wärmeübertragungsfluid hindurch treten und um einzelne Teilchen des magnetokalorischen Materials herum fließen kann, aber das Material **95** kann auch physikalisch anders gebildet werden, z.B. in Form von beabstandeten Materialplatten. Bei Bedarf kann das Teilchenmaterial zur größeren strukturellen Stabilität gesintert werden. Das jeweils gewählte magnetokalorische Material hängt von dem Temperaturbereich der Regeneratorvorrichtung und von dem vorhandenen Magnetfeld des Magnets **34** ab. In der oben genannten US-Patentschrift Nr. 5 249 424 werden Beispiele derartiger Materialien, die besonders geeignet für eine Verwendung bei kryogenischen Temperaturen sind, genannt. Zum Betreiben bei oder nahe Raumtemperatur ist eine Art eines geeigneten magnetokalorischen Materials Gadolinium, und ein geeignetes Wärmeübertragungsfluid ist Wasser oder Wasser mit Gefrierschutzmittel gemischt. Vorzugsweise wird zur Unterbindung von chemischen Reaktionen zwischen dem magnetokalorischen Material und dem Wärmeübertragungsfluid

eine gepufferte Wasserlösung verwendet.

[0049] In der Wand des Außenrohrs **76** des sich bewegenden Elements sind an den Enden der Betten **45** bzw. **46** an an den Endwandungen **93** angrenzenden Stellen Anschlüsse **97** ausgebildet. Vorzugsweise werden wie in der [Fig. 6](#) abgebildet diese Anschlüsse als Reihe in der Wand des Außenrohrs **76** beabstandeter Schlitze ausgebildet, welche bevorzugt durch ein Sieb **98** abgedeckt sind, um ein Wandern losen magnetokalorischen Materials **95** durch die die Anschlüsse **97** bildenden Schlitze bzw. ein Verstopfens der Schlitze zu verhindern. Vorzugsweise umfasst das sich bewegende zweite Ventilelement **44** ferner ein zylindrisches Rohr **99**, welches zwischen den Betten **45** und **46** um das Außenrohr montiert und an den jeweiligen Endwänden **93** dieser beiden Betten befestigt ist, um einen festen Abstand der Betten **45** und **46** vorzusehen und die Betten zuverlässiger an dem Außenrohr **76** fest zu halten.

[0050] Eine detailliertere Außenansicht des Aufbaus des ersten Ventilelements **43** entnimmt man der [Fig. 6](#). Vorzugweise wird jede der im Innenrohr **75** gebildeten Öffnungen **81**, **82**, **83**, **84**, **86** und **87** als mittig gedornter Abschnitt **100** in der Wand des Innenrohrs gebildet, an dessen beiden Seiten Nuten **102** in der Rohrwand gebildet werden, in der Dichtungen wie z.B. Gummi-O-Ringe **105** montiert sind. Bevorzugt sind die Öffnungen **81**, **82**, **83**, **84**, **86** und **87** als in der Wandung des Rohrs **75** ausgebildete Schlitze **103** ausgeführt, die sich bis zur entsprechenden Viertelkreis-Rohrleitung des ersten Ventilelements erstrecken. Von einer der Viertelkreisrohrleitungen durch die Schlitze **103** hindurch nach außen fließendes Wärmeübertragungsfluid kann ganz um den Außenumfang des gedornten Schlitzes **100** herum strömen, wird jedoch durch die O-Ring-Dichtungen **105** daran gehindert, in den Zwischenraum zwischen dem Innen- und Außenrohr **75** und **76** zu fließen. Somit kann das Fluid an Stellen um den gesamten Außenumfang des Außenrohrs zu den Anschlüssen **97** in dem Außenrohr fließen. Analog dazu kann von den Regeneratorbetten **44** bzw. **45** durch die Anschlüsse **97** zurückfließendes Wärmeübertragungsfluid in den von der Einkerbung **100** bestimmten Raum um den gesamten Außenumfang des Innenrohrs fließen, bis das Fluid zur Position der Schlitze **103** und dann durch die Schlitze in die entsprechende Viertelkreisrohrleitung innerhalb des ersten Ventilelements **43** fließt.

[0051] Bezüglich der Ansicht der [Fig. 7–Fig. 14](#) wird eine bevorzugte Art der Ausbildung der Innenrohrleitungen des ersten Ventilelements innerhalb des Innenrohrs **75** veranschaulicht. Wie in der Seitenansicht in der [Fig. 7](#) sowie in der Endansicht in der [Fig. 8](#) gezeigt können die senkrechten Innenwandungen **79** bzw. **80** zunächst durch Zusammenkleben von Streifen aus Flachmaterial, z.B. Epoxidglas-

faser oder Polyvinylchlorid, mit einem entsprechenden Klebstoff (z.B. Hysol®-Epoxid) ausgebildet werden. Wie in einer Seitenansicht in der [Fig. 9](#) und in einer Endansicht in der [Fig. 10](#) gezeigt wird ein entsprechende Außenmaße aufweisendes dünnwandiges Rohr **106** der Länge nach an diametral entgegengesetzten Schnittstellen **107** in zwei Hälften zerschnitten. In die Wände der zwei Hälften werden dann in der Mitte jeder Hälfte Nuten **108** eingeschnitten. Die Breite der Wände **79** und **80** wird so gewählt, dass die Wände **80** in die Nuten **108** einpassen, während die Enden der Wände **79** den durch die Einschnitte **107** erzeugten Raum füllen, wie in einer Seitenansicht in der [Fig. 11](#) und in einer Endansicht in [Fig. 12](#) dargestellt. Die senkrechten Wände **79** und **80** werden mit Klebstoff, z.B. Epoxid, fixiert, und dann kann die Außenseite des vollständigen Rohrs **75** zum Ausbilden einer glatten, starken Struktur beschichtet werden, z.B. durch Gelbeschichtung der Außenseite des Rohrs mit Hysol®-Epoxid. Ein Ende des Rohrs kann sodann durch Kleben eines Endstopfens **109** in die Bohrung des Rohrs **75** mit einer Kappe versehen werden, um die von den Wänden **79** und **80** gebildeten Viertelkreise wie in der [Fig. 11](#) abgebildet abzudichten. Ein spitzenloser Rundschleif- und Bearbeitungsschritt wird sodann ausgeführt, um die O-Ring-Nuten **102**, die gedornen Bereiche **100** sowie die nicht in den [Fig. 11](#) und [Fig. 13](#) gezeigten Schlitz **103** auszubilden. Wie in der Seitenansicht in der [Fig. 13](#) und in der Endansicht in der [Fig. 14](#) gezeigt, weist das andere Ende des Rohrs **75** dann das daran montierte Verteilungsrohr **49** auf. Das Verteilungsrohr kann z.B. aus einer durch Innenwandungen in vier Kammern unterteilten Ummantelung gebildet werden, wobei sich oben an jeder Kammer Öffnungen befinden, die in Kommunikation mit den vier Viertelkreisrohrleitungen innerhalb des Innenrohrs **75** sowie mit vier Anschlüssen **110** in den Außenwänden des Verteilungsrohrs **49** stehen, die die Einlass- und Auslassanschlüsse des ersten Ventilelements **43** darstellen, wobei jeder in eine jeweilige Kammer des Verteilungsrohrs mündet, an der die Rohrleitungen **26**, **28**, **30** und **31** angeschlossen sind.

[0052] Es versteht sich von selbst, dass die Erfindung nicht auf den speziellen Ausbau bzw. auf die spezielle Anordnung der hier dargestellten und beschriebenen Teile beschränkt ist, sondern dass sie alle abgewandelten Ausführungsformen einschließt, die innerhalb des Schutzbereichs der nachfolgenden Ansprüche fallen.

Patentansprüche

1. Aktive magnetische Kühlvorrichtung, welche umfasst:

- (a) einen ein Magnetfeld erzeugenden Magnet (**34**);
- (b) ein Bett, welches ein den magnetokalorischen Effekt aufweisendes Material umfasst, das porös ist und das Strömen von Wärmeübertragungsfluid durch

dieses magnetokalorische Material zulässt, und

- (c) einen Hubkolbenantrieb, gekennzeichnet durch:
- (d) ein Verteilungsventil (**42**) mit einem ersten Ventilelement (**43**) und einem sich bewegenden zweiten Ventilelement (**44**), welche gleitend ineinander in Eingriff stehen, wobei das erste Ventilelement und das sich bewegende zweite Ventilelement jeweils Anschlüsse aufweisen, durch welche dem Ventilelement Wärmeübertragungsfluid zugeführt und von diesem aufgenommen werden kann;
- (e) wobei das Bett ein magnetisches Regeneratorbett ist, welches an dem sich bewegenden zweiten Ventilelement (**44**) angebracht ist, um sich mit diesem zu bewegen, wobei das sich bewegende zweite Ventilelement einen in eine erste Seite des Betts mündenden Anschluss sowie einen in eine zweite Seite des Betts mündenden Anschluss aufweist, so dass zwischen den Anschlüssen strömendes Fluid durch das magnetokalorische Material des Betts strömt;
- (f) wobei der Hubkolbenantrieb (**48**) mit dem sich bewegenden zweiten Ventilelement verbunden ist, um das sich bewegende zweite Ventilelement und das daran angebrachte Regeneratorbett zwischen einer ersten Position, in welcher sich das Regeneratorbett außerhalb des Magnetfelds des Magnets befindet, und einer zweiten Position, in welcher sich das Regeneratorbett in dem Magnetfeld des Magnets befindet, zu verschieben;
- (g) einen heißen Wärmetauscher (**23**);
- (h) einen kalten Wärmetauscher (**24**);
- (i) Rohrleitungen (**26**, **27**, **28**, **30**, **31**), welche mit den Anschlüssen des ersten Ventilelements und mit dem heißen und dem kalten Wärmetauscher verbunden sind, wobei die Rohrleitungen Wärmeübertragungsfluid in einem Kreislauf leiten, wobei der Kreislauf vom Bett über das Verteilungsventil bis zu dem kalten Wärmetauscher und dann zurück über das Verteilungsventil umfasst, wenn sich das Bett außerhalb des Magnetfelds befindet, und der Kreislauf vom Bett über das Verteilungsventil bis zu dem heißen Wärmetauscher und dann zurück über das Verteilungsventil umfasst, wenn sich das Bett in dem Magnetfeld befindet, das Verteilungsventil das Strömen durch diese so leitet, so dass der Strömungskreislauf durch die Rohrleitungen in beiden Positionen des Verteilungsventils in gleicher Richtung gewahrt wird, und wobei die Richtung des Strömens durch das Bett in jeder Position des Ventils umgekehrt ist; und
- (j) eine Pumpe (**25**), welche in den Rohrleitungen zum Fördern von Wärmeübertragungsfluid durch den heißen und den kalten Wärmetauscher, die Rohrleitungen und das Verteilungsventil verbunden ist.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Ventilelement (**43**) als langgestrecktes hohles Innenrohr mit einer Außenfläche ausgebildet ist und das sich bewegende zweite Ventilelement als langgestrecktes hohles Rohr mit einem Innendurchmesser etwas größer als der Außendurchmesser des Innenrohrs ausgebildet und für axi-

ales Gleiten an dem Innenrohr angebracht ist, wobei das Innenrohr ein Innenlumen aufweist, welches in vier Viertelkreise unterteilt ist, um vier Viertelkreisrohrleitungen auszubilden, und zwei Paar Öffnungen (83, 84, 86, 87) in der Wand des Innenrohrs aufweist, wobei ein erstes Paar Öffnungen (83, 84) mit zwei der vier Viertelkreisrohrleitungen in Verbindung steht und an einer Stelle außerhalb des Magnetfelds des Magnets angeordnet ist und ein zweites Paar Öffnungen (86, 87) mit den anderen zwei Viertelkreisrohrleitungen in Verbindung steht und an einer Stelle innerhalb des Magnetfelds des Magnets angeordnet ist, und wobei das Bett um das Außenrohr (76) des sich bewegenden zweiten Ventilelements herum angebracht ist und wobei die Anschlüsse in dem sich bewegenden zweiten Ventilelement, welche mit dem Bett in Verbindung stehen, bei einem Abstand gleich dem Abstand zwischen den Paaren von Öffnungen in dem Innenrohr beabstandet sind, so dass in der ersten Position des Verteilungsventils die in das Bett mündenden Anschlüsse in dem sich bewegenden zweiten Ventilelement mit ersten beiden der Viertelkreisrohrleitungen des Innenrohrs in Verbindung stehen, und wobei in der zweiten Position des Verteilungsventils die in das Bett mündenden Anschlüsse in dem sich bewegenden zweiten Ventilelement mit den Viertelkreisrohrleitungen in Verbindung stehen, mit welchen sie in der ersten Position nicht in Verbindung standen.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass jedes Regeneratorbett ein zylindrisches Außengehäuse (92) und Endwände (93) aufweist, um eine ringförmige Umhüllung zwischen den Wänden des Gehäuses, den Endwänden und dem Außenrohr des sich bewegenden zweiten Ventilelements auszubilden, wobei das poröse magnetokalorische Material die ringförmige Umhüllung füllt.

4. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der kalte Wärmetauscher für das Kühlen eines Fluids dient und wobei, wenn sich das Bett außerhalb des Magnetfelds befindet, der Kreislauf umfasst:
einen ersten Unterkreislauf, welcher umfasst:
– von dem Bett über das Verteilungsventil
– dann durch den kalten Wärmetauscher
– dann durch die Pumpe und
– dann zurück zu dem Verteilungsventil; und
einen zweiten Unterkreislauf, welcher umfasst:
– von dem Bett und dann zurück zu dem Verteilungsventil;
und wobei, wenn sich das Bett in dem Magnetfeld befindet, der Kreislauf umfasst:
– von dem Bett über das Verteilungsventil
– dann durch den heißen Wärmetauscher
– dann durch die Pumpe und
– dann zurück zu dem Verteilungsventil.

5. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, welche umfasst: ein magnetisch betätigtes Ventil (58), welches in einer von der Pumpe führenden Rohrleitung angeschlossen ist, und ein mit dem Antrieb und dem Magnetventil verbundenes Steuergerät (54), um den Antrieb so zu steuern, dass er das Verteilungsventil zu ausgewählten Zeitpunkten schaltet und das Verteilungsventil veranlasst, an seiner ersten und zweiten Position über ausgewählte Zeitspannen zu verharren, und um das Magnetventil so zu steuern, dass es das Strömen des Wärmeübertragungsfluids von der Pumpe sperrt, wenn das Verteilungsventil zwischen seinen beiden Positionen geschaltet wird, und um das Magnetventil zu öffnen, um ein Strömen von der Pumpe zuzulassen, wenn das Verteilungsventil in seinen beiden Positionen verharrt.

6. Vorrichtung nach Anspruch 6, welche ein um die Pumpe herum angeschlossenes Magnetventil (60) umfasst, welches zu dessen Steuerung mit dem Steuergerät verbunden ist, so dass es schließt, wenn das Verteilungsventil in seinen beiden Positionen verharrt, und öffnet, wenn das Verteilungsventil zwischen seinen beiden Positionen geschaltet wird.

7. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Magnet aus einer Magnetwicklung eines Supraleiters gebildet ist und ein Dewar-Gefäß, in welchem die supraleitende Magnetwicklung zum Kühlen der Wicklung gehalten wird, sowie eine mittlere Öffnung in dem Dewar-Gefäß, welche durch die supraleitende Magnetwicklung verläuft, umfasst, wobei das Verteilungsventil und das daran angebrachte Regeneratorbett in der Öffnung in dem Dewar-Gefäß für die Bewegung des sich bewegenden zweiten Ventilelements durch den Antrieb von einer ersten Position, in welcher sich das Regeneratorbett außerhalb des Magnetfelds der Magnetwicklung befindet, zu einer zweiten Position, in welcher sich das Regeneratorbett in dem Magnetfeld der Magnetwicklung befindet, angeordnet sind.

8. Vorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Anschlüsse in dem sich bewegenden zweiten Ventilelement durch die Wand des Außenrohrs des sich bewegenden zweiten Ventilelements an Positionen benachbart zu den Endwänden des Gehäuses des Regeneratorbetts ausgebildete Schlitze umfassen.

9. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass das Lumen des Innenrohrs durch gerade, sich schneidende Wände (79, 80), welche sich axial durch das Innenrohr erstrecken und mit der zylindrischen Wand des Innenrohrs greifen, in vier Viertelkreisrohrleitungen unterteilt ist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch ge-

kennzeichnet, dass das erste Ventilelement einen Rohrverteiler (49) umfasst, welcher an einem Ende des Innenrohrs angebracht ist und vier Kammern aufweist, wobei jede Kammer mit einer der vier Viertelkreisrohrleitungen des unterteilten Lumens des Innenrohrs in Verbindung steht, und die Anschlüsse des ersten Ventilelements als Öffnungen in dem Rohrverteiler ausgebildet sind, welche zu den vier Kammern in dem Rohrverteiler führen, wovon jede mit einer der Viertelkreisrohrleitungen des unterteilten Lumens des Innenrohrs in Verbindung steht.

11. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das magnetische Regeneratorbett ein erstes Regeneratorbett (45) ist und die Vorrichtung weiterhin ein zweites Regeneratorbett (46) umfasst, welches Material enthält, das den magnetokalorischen Effekt aufweist, das porös ist und das Strömen von Wärmeübertragungsfluid durch dieses magnetokalorische Material zulässt, und wobei das zweite Regeneratorbett so an dem sich bewegenden zweiten Ventilelement angebracht ist, dass die beiden Regeneratorbetten von einander beabstandet sind, wobei das sich bewegende zweite Ventilelement einen Anschluss (97) aufweist, welcher in eine erste Seite des zweiten Betts mündet, und einen Anschluss (97) aufweist, welcher in eine zweite Seite des zweiten Betts mündet, so dass zwischen den Anschlüssen strömendes Fluid durch das magnetokalorische Material des zweiten Regeneratorbetts strömt; wobei, wenn sich das erste Regeneratorbett außerhalb des Magnetfelds befindet, der Kreislauf vom ersten Regeneratorbett über das Verteilungsventil bis zu dem kalten Wärmetauscher und dann zurück über das Verteilungsventil zu dem zweiten Regeneratorbett und dann über das Verteilungsventil zu dem heißen Wärmetauscher und dann zurück über das Verteilungsventil umfasst; und wobei, wenn sich das erste Regeneratorbett in dem Magnetfeld befindet, der Kreislauf von dem ersten Regeneratorbett über das Verteilungsventil zu dem heißen Wärmetauscher und dann zurück über das Verteilungsventil zu dem zweiten Regeneratorbett und dann über das Verteilungsventil zu dem kalten Wärmetauscher und dann zurück über das Verteilungsventil umfasst.

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Ventilelement (43) als langgestrecktes hohles Innenrohr mit einer Außenfläche ausgebildet ist und das sich bewegende zweite Ventilelement als langgestrecktes hohles Rohr mit einem Innendurchmesser etwas größer als der Außendurchmesser des Innenrohrs ausgebildet und für axiales Gleiten an dem Innenrohr angebracht ist, wobei das Innenrohr ein Innenlumen aufweist, welches in vier Viertelkreise unterteilt ist, um vier Viertelkreisrohrleitungen auszubilden, und drei Paar Öff-

nungen (81, 82, 83, 84, 86, 87) in der Wand des Innenrohrs aufweist, wobei zwei Paar gleich beabstandeter Öffnungen (81, 82, 83, 84) mit zwei der vier Viertelkreisrohrleitungen in Verbindung stehen und an einer Stelle außerhalb des Magnetfelds des Magnets angeordnet sind und ein zwischen den anderen zwei Paaren angeordnetes drittes Paar Öffnungen (86, 87) mit den anderen zwei Viertelkreisrohrleitungen in Verbindung steht und an einer Stelle innerhalb des Magnetfelds des Magnets angeordnet ist, und wobei das erste Regeneratorbett und das zweite Regeneratorbett um das Außenrohr (76) des sich bewegenden zweiten Ventilelements herum angebracht sind

und wobei die Anschlüsse in dem sich bewegenden zweiten Ventilelement, welche mit den Betten in Verbindung stehen, bei einem Abstand gleich dem Abstand zwischen den Paaren von Öffnungen in dem Innenrohr beabstandet sind, so dass

in der ersten Position des Verteilungsventils die in das erste Bett mündenden Anschlüsse in dem sich bewegenden zweiten Ventilelement mit ersten beiden der Viertelkreisrohrleitungen des Innenrohrs in Verbindung stehen und die in das zweite Bett mündenden Anschlüsse in dem sich bewegenden zweiten Ventilelement mit den anderen beiden Viertelkreisrohrleitungen des Innenrohrs in Verbindung stehen und

wobei in der zweiten Position des Verteilungsventils die in die beiden Betten mündenden Anschlüsse in dem sich bewegenden zweiten Ventilelement mit den Viertelkreisrohrleitungen in Verbindung stehen, mit welchen sie in der ersten Position nicht in Verbindung standen.

13. Vorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass jedes Regeneratorbett ein zylindrisches Außengehäuse (92) und Endwände (93) aufweist, um eine ringförmige Umhüllung zwischen den Wänden des Gehäuses, den Endwänden und dem Außenrohr des sich bewegenden zweiten Ventilelements auszubilden, wobei das poröse magnetokalorische Material die ringförmige Umhüllung füllt.

14. Vorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass der kalte Wärmetauscher für das Kühlen eines Fluids dient und der Kreislauf für das Bett, welches sich außerhalb des Magnetfelds befindet, umfasst:

einen ersten Unterkreislauf, welcher umfasst:

- von dem Bett über das Verteilungsventil
- dann durch den kalten Wärmetauscher
- dann durch die Pumpe und

– dann zurück zu dem Verteilungsventil; und

einen zweiten Unterkreislauf, welcher umfasst:

- von dem Bett und dann zurück zu dem Verteilungsventil;

und der Kreislauf für das Bett, welches sich in dem Magnetfeld befindet, umfasst:

- von dem Bett über das Verteilungsventil
- dann durch den heißen Wärmetauscher
- dann durch die Pumpe und
- dann zurück zu dem Verteilungsventil.

15. Vorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, welche umfasst: ein magnetisch betätigtes Ventil (**58**), welches in einer von der Pumpe führenden Rohrleitung angeschlossen ist, und ein mit dem Antrieb und dem Magnetventil verbundenes Steuergerät (**54**), um den Antrieb so zu steuern, dass er das Verteilungsventil zu ausgewählten Zeitpunkten schaltet und das Verteilungsventil veranlasst, an seiner ersten und zweiten Position über ausgewählte Zeitspannen zu verharren, und um das Magnetventil so zu steuern, dass es das Strömen des Wärmeübertragungsfluids von der Pumpe sperrt, wenn das Verteilungsventil zwischen seinen beiden Positionen geschaltet wird, und um das Magnetventil zu öffnen, um ein Strömen von der Pumpe zuzulassen, wenn das Verteilungsventil in seinen beiden Positionen verharrt.

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, welche ein um die Pumpe herum angeschlossenes Magnetventil (**60**) umfasst, welches zu dessen Steuerung mit dem Steuergerät verbunden ist, so dass es schließt, wenn das Verteilungsventil in seinen beiden Positionen verharrt, und öffnet, wenn das Verteilungsventil zwischen seinen beiden Positionen geschaltet wird.

17. Vorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Magnet aus einer Magnetwicklung eines Supraleiters gebildet ist und ein Dewar-Gefäß, in welchem die supraleitende Magnetwicklung zum Kühlen der Wicklung gehalten wird, sowie eine mittlere Öffnung in dem Dewar-Gefäß, welche durch die supraleitende Magnetwicklung verläuft, umfasst, wobei das Verteilungsventil und das daran angebrachte Regeneratorbett in der Öffnung in dem Dewar-Gefäß für die Bewegung des sich bewegenden zweiten Ventilelements durch den Antrieb von einer ersten Position, in welcher sich das Regeneratorbett außerhalb des Magnetfelds der Magnetwicklung befindet, zu einer zweiten Position, in welcher sich das Regeneratorbett in dem Magnetfeld der Magnetwicklung befindet, angeordnet sind.

18. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Anschlüsse in dem sich bewegenden zweiten Ventilelement durch die Wand des Außenrohrs des sich bewegenden zweiten Ventilelements an Positionen benachbart zu den Endwänden des Gehäuses des Regeneratorbetts ausgebildete Schlitze umfassen.

19. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Lumen des Innenrohrs durch gerade, sich schneidende Wände (**79**, **80**), welche

sich axial durch das Innenrohr erstrecken und mit der zylindrischen Wand des Innenrohrs greifen, in vier Viertelkreisrohrleitungen unterteilt ist.

20. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Ventilelement einen Rohrverteiler (**49**) umfasst, welcher an einem Ende des Innenrohrs angebracht ist und vier Kammern aufweist, wobei jede Kammer mit einer der vier Viertelkreisrohrleitungen des unterteilten Lumens des Innenrohrs in Verbindung steht, und die Anschlüsse des ersten Ventilelements als Öffnungen in dem Rohrverteiler ausgebildet sind, welche zu den vier Kammern in dem Rohrverteiler führen, wovon jede mit einer der Viertelkreisrohrleitungen des unterteilten Lumens des Innenrohrs in Verbindung steht.

21. Vorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Antrieb das sich bewegende zweite Ventilelement zwischen einer ersten Position, in welcher sich das erste Regeneratorbett außerhalb des Magnetfelds und das zweite Regeneratorbett in dem Magnetfeld befindet, und einer zweiten Position, in welcher sich das erste Regeneratorbett in dem Magnetfeld und das zweite Regeneratorbett außerhalb des Magnetfelds befindet, bewegt.

22. Vorrichtung nach Anspruch 1, 2, 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Außenrohr des sich bewegenden zweiten Ventilelements alle Paare von Öffnungen in dem Innenrohr des ersten Ventilelements an allen Positionen des sich bewegenden zweiten Ventilelements bedeckt und Dichtungen zwischen dem Innen- und dem Außenrohr angrenzend an den Öffnungen in dem Innenrohr umfasst, um einem Strömen von Wärmeübertragungsfluid von den Öffnungen in dem Innenrohr in den Raum zwischen dem Innen- und dem Außenrohr entgegenzuwirken, wobei Nute (**102**) in der Außenfläche des Innenrohrs an Positionen an jeder Seite der Öffnungen in dem Innenrohr ausgebildet sind und in den Nuten angebrachte O-Ringe umfassen, welche gegen die Innenfläche des Außenrohrs abdichten, um um jede Öffnung Dichtungen vorzusehen, um einem Strömen von Fluid von der Öffnung in den Raum zwischen dem Innen- und dem Außenrohr entgegenzuwirken, während gleichzeitig ein Gleiten des Innen- und des Außenrohrs zu einander zugelassen wird.

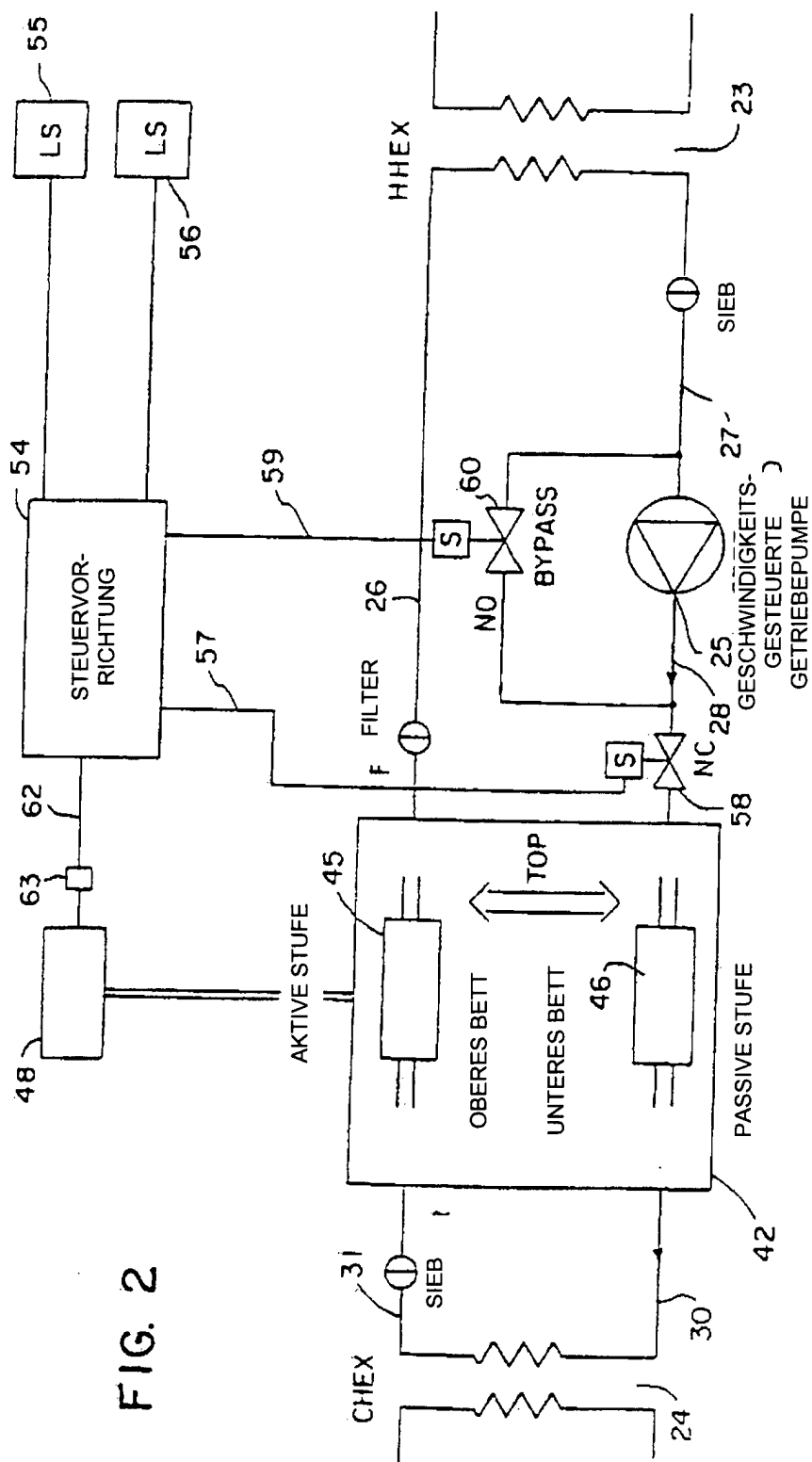
23. Vorrichtung nach Anspruch 1, 2, 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Außenrohr des sich bewegenden zweiten Ventilelements alle Paare von Öffnungen in dem Innenrohr des ersten Ventilelements an allen Positionen des sich bewegenden zweiten Ventilelements bedeckt und Dichtungen zwischen dem Innen- und dem Außenrohr angrenzend an den Öffnungen in dem Innen-

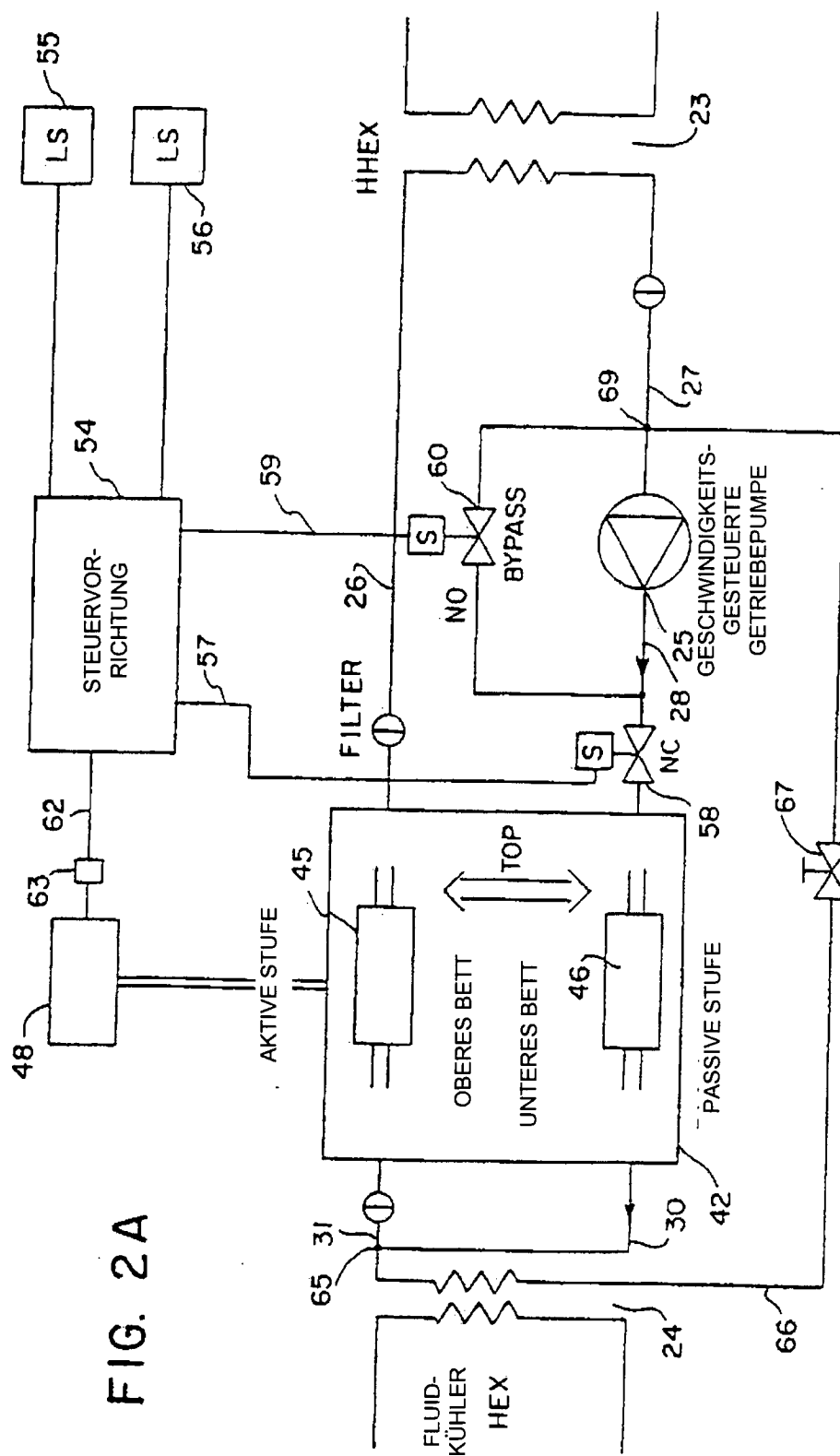
rohr umfasst, um dem Strömen von Wärmeübertragungsfluid von den Öffnungen in dem Innenrohr in den Raum zwischen dem Innen- und dem Außenrohr entgegenzuwirken.

24. Vorrichtung nach Anspruch 1, 2, 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass eine Vertiefung (**100**) um den Umfang des Innenrohrs an der Position jeder Öffnung in dem Innenrohr ausgebildet ist, so dass Fluid in der Vertiefung um den gesamten Umfang des Innenrohrs zur Öffnung hin und von dieser weg strömen kann.

25. Kühlvorrichtung nach Anspruch 1, 2, 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Antrieb einen Druckluftzylinder mit einer sich von diesem erstreckenden Welle umfasst, welche mit dem Außenrohr des sich bewegenden zweiten Ventilelements verbunden ist, wobei der Druckluftzylinderantrieb dazu dient, die Welle desselben und das mit dieser verbundene Außenrohr zwischen der ersten Position und der zweiten Position zu bewegen.

Es folgen 8 Blatt Zeichnungen





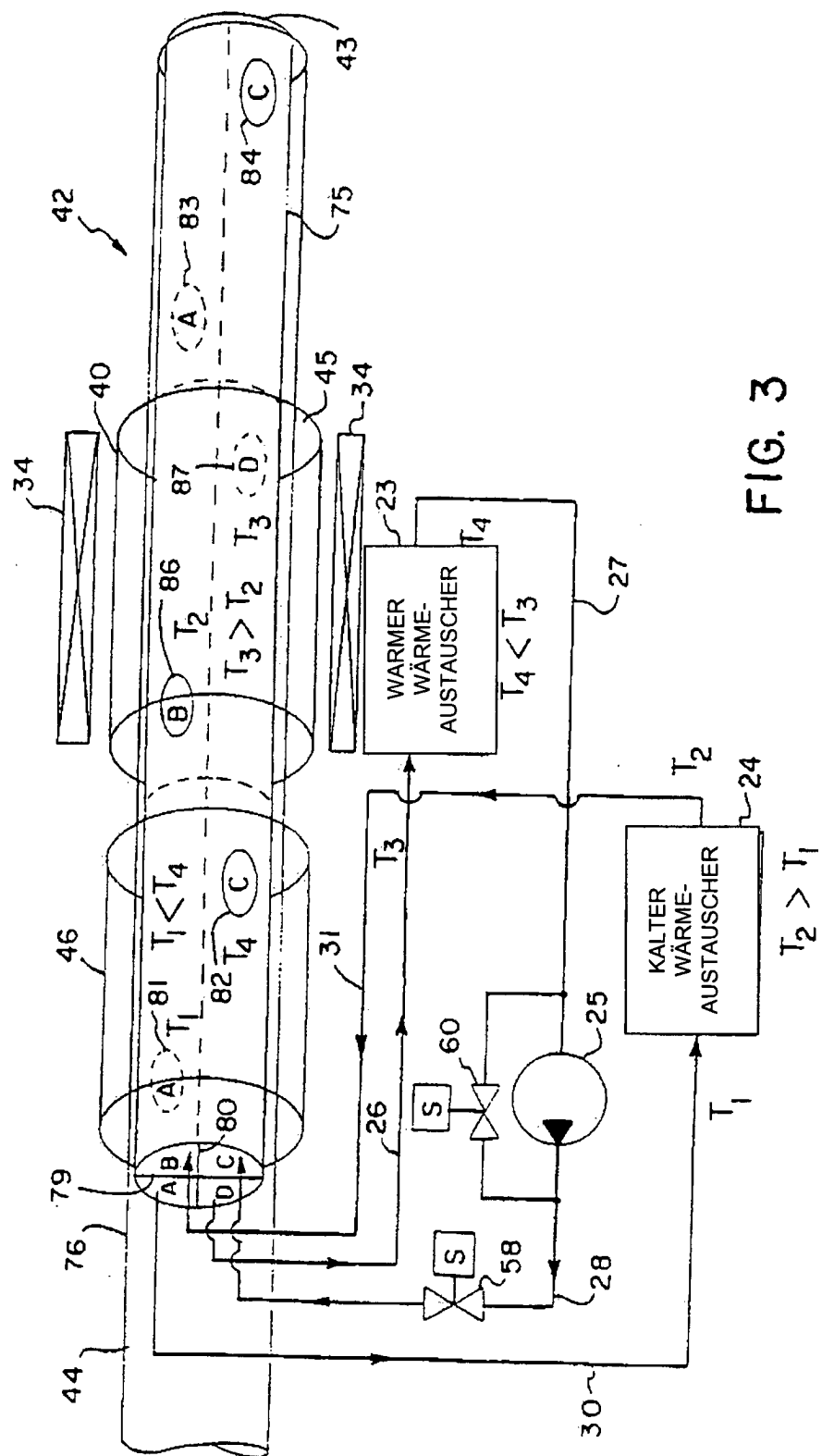


FIG. 3

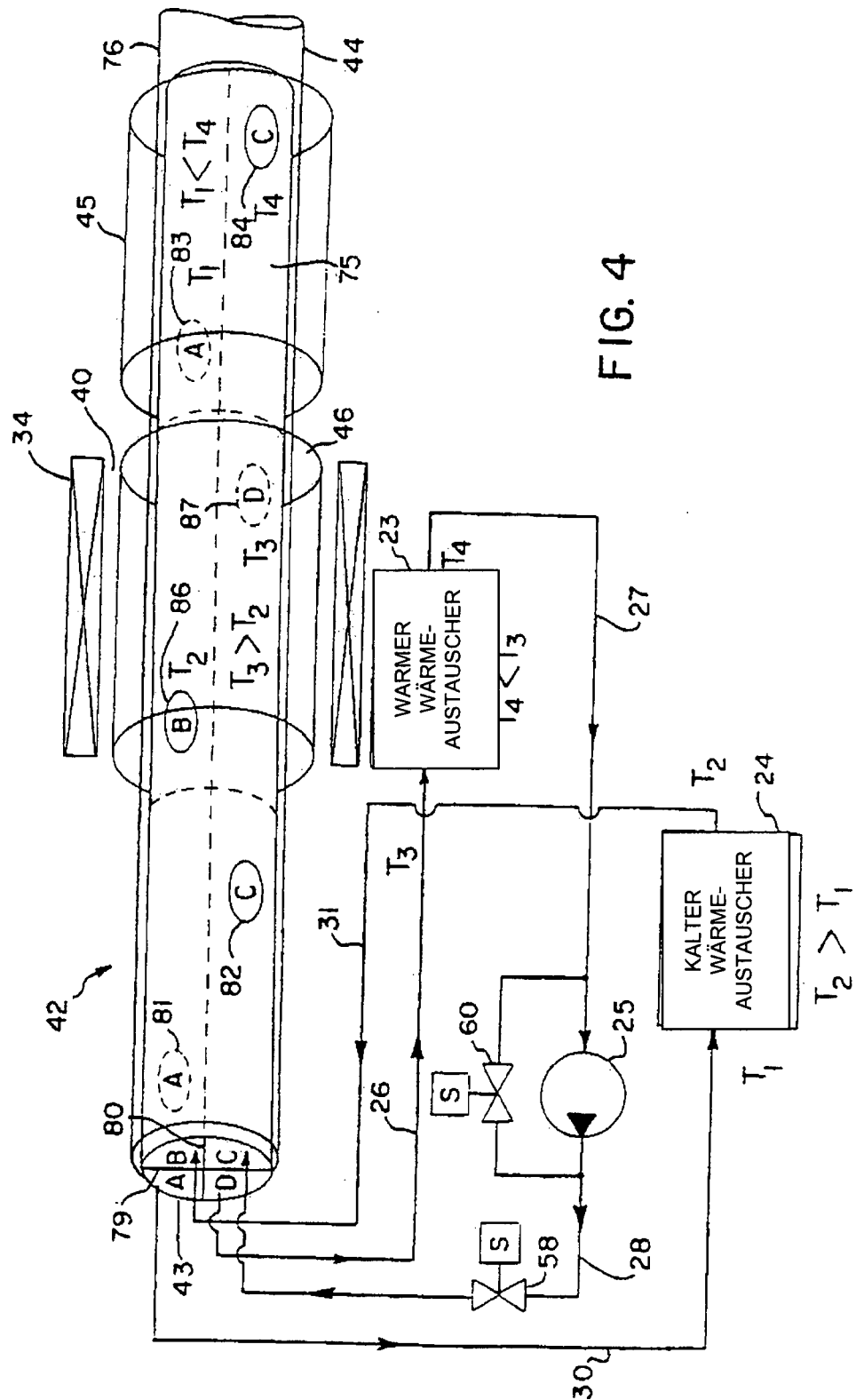


Fig. 4

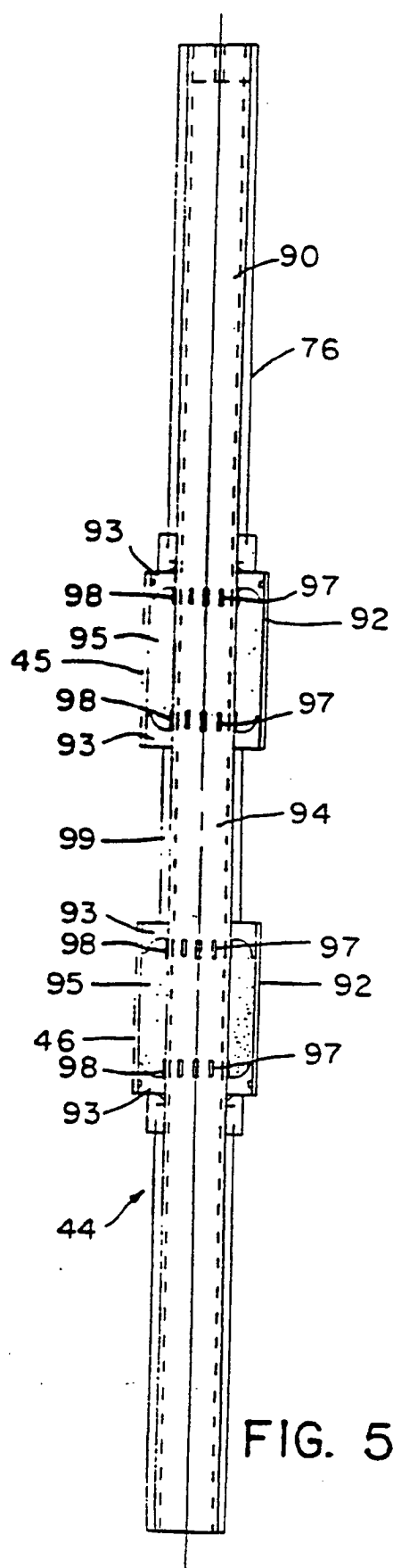


FIG. 5

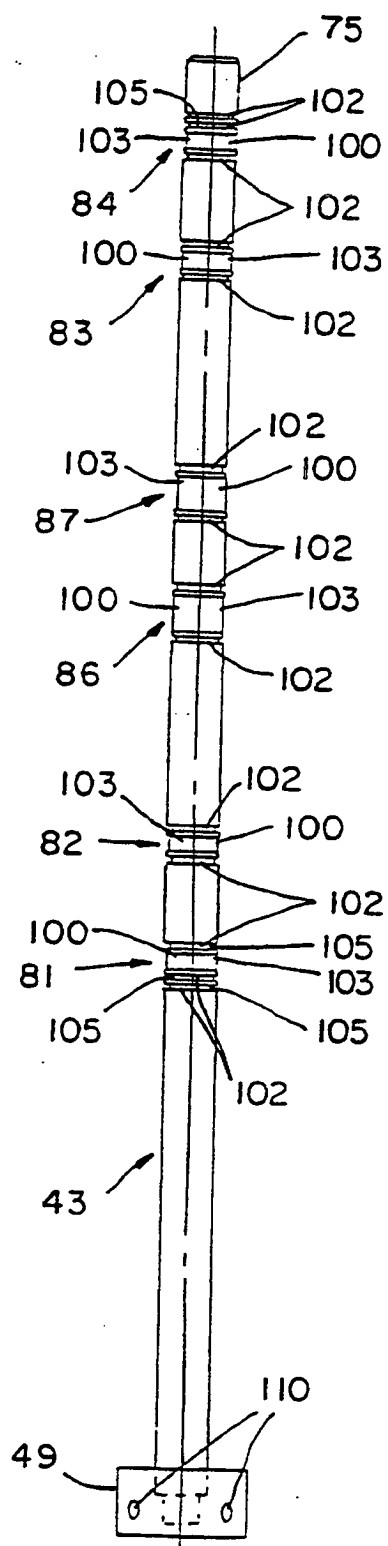


FIG. 6

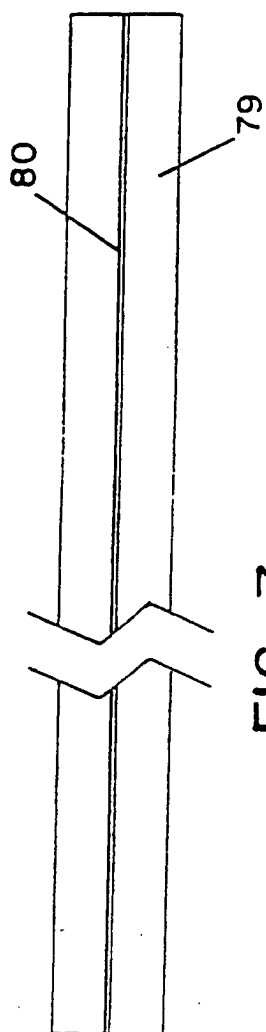


FIG. 7

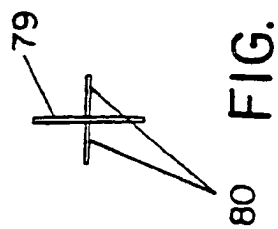


FIG. 8

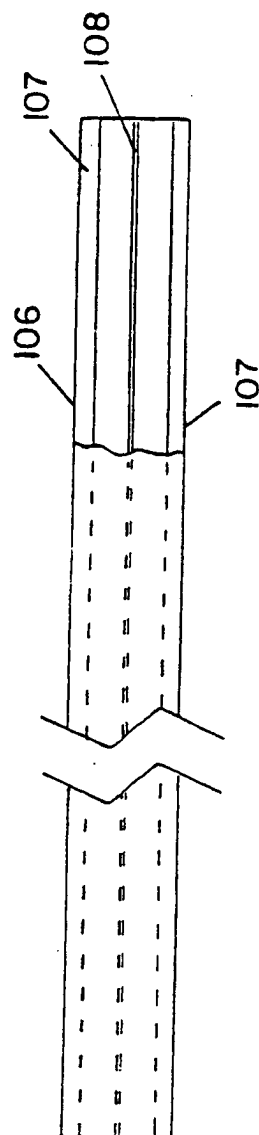


FIG. 9

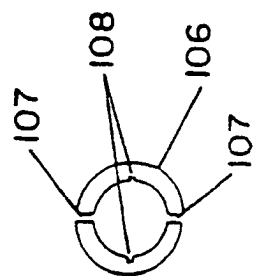


FIG. 10

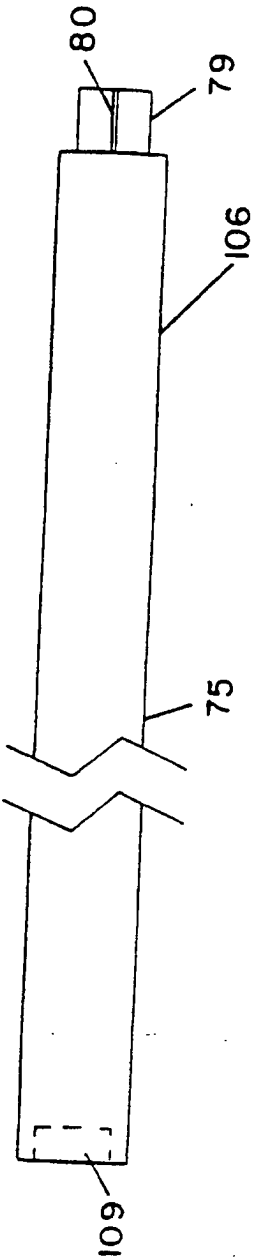


FIG. 11

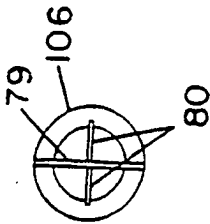


FIG. 12

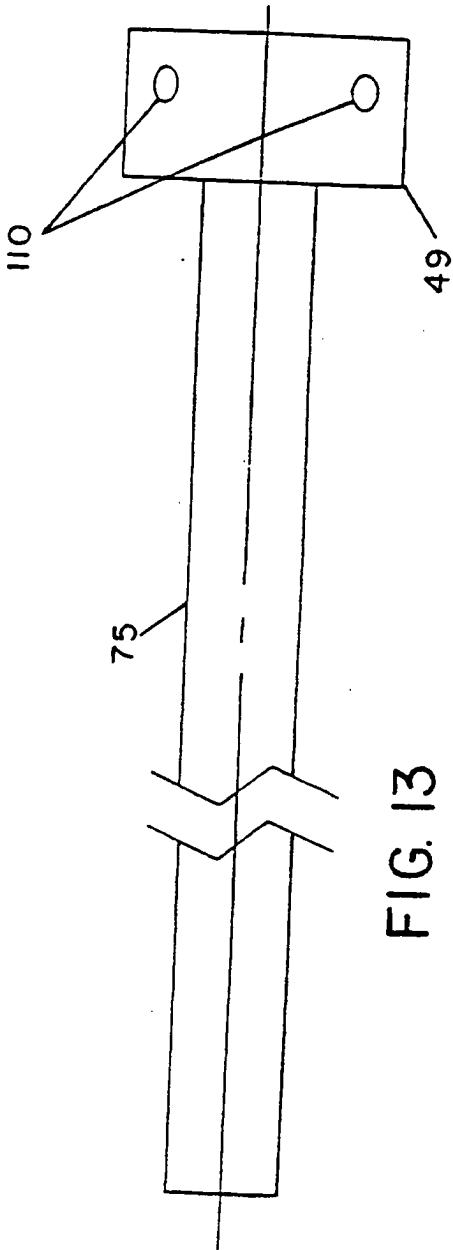


FIG. 13

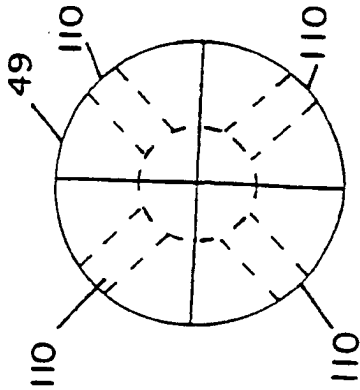


FIG. 14