



(11) **EP 2 820 299 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:  
**28.09.2016 Patentblatt 2016/39**

(21) Anmeldenummer: **13703838.6**

(22) Anmeldetag: **14.02.2013**

(51) Int Cl.:  
**F04B 39/00<sup>(2006.01)</sup>**

(86) Internationale Anmeldenummer:  
**PCT/EP2013/052946**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:  
**WO 2013/124202 (29.08.2013 Gazette 2013/35)**

(54) **FLÜSSIGKOLBENANORDNUNG MIT PLATTENTAUSCHER FÜR DIE QUASI-ISOTHERME VERDICHTUNG UND ENTSPANNUNG VON GASEN**

LIQUID PISTON ARRANGEMENT WITH A PLATE-TYPE HEAT EXCHANGER FOR THE QUASI ISOTHERMAL COMPRESSION AND EXPANSION OF GASES

SYSTÈME À PISTON LIQUIDE POURVU D'UN ÉCHANGEUR À PLAQUES POUR UNE COMPRESSION ET UNE DILATATION PRESQUE ISOTHERMES DE GAZ

(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: **20.02.2012 DE 102012003288**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**07.01.2015 Patentblatt 2015/02**

(73) Patentinhaber: **Cyphelly, Iván**  
**35017 Las Palmas de Gran Canaria (ES)**

(72) Erfinder: **Cyphelly, Iván**  
**35017 Las Palmas de Gran Canaria (ES)**

(74) Vertreter: **Manitz, Finsterwald & Partner GbR**  
**Martin-Greif-Strasse 1**  
**80336 München (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:  
**EP-B1- 2 273 119 WO-A1-00/70221**  
**WO-A1-2009/034421 WO-A1-2010/128224**  
**DE-A1- 4 430 716 DE-A1-102008 042 828**

**EP 2 820 299 B1**

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

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine Flüssigkolbenanordnung mit Plattentauscher für die quasi-isotherme Verdichtung und Entspannung von Gasen.

**[0002]** Die Hochdruck-Luftspeicherung ist seit dem 19. Jahrhundert bekannt, konnte sich bislang aber nur in spezifischen Anwendungen durchsetzen. In letzter Zeit ist jedoch das Interesse an dieser Technologie gestiegen, da nach Wegen gesucht wird, erneuerbare Energien in dezentraler Anordnung zu nutzen und die bestehenden Netze mit lokalen Speichern zu stützen.

**[0003]** Herkömmliche Anordnungen zur Verdichtung und Entspannung von Gasen sind aus folgenden Druckschriften bekannt:

- DE 34 08 633 A1,
- US 586 100 A,
- EP 2 273 119 B1,
- Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Energie BFE, Schlussbericht Mai 2004, Einsatz von Druckluftspeichersystemen, I. Cyphelly, A. Rufer, Ph. Brückmann, W. Menhardt, A. Reller, Cyphelly & Co, Champ de Rive, CP 18, 2416 Les Brenets, DIS-Projekt Nr. 100406, DIS-Vertrags Nr. 150504,
- Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Energie BFE, Jahresbericht 2004, 27. Dezember 2004, Projekt Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzeptes BOP-B, Philipp Brückmann, Iván Cyphelly, Markus Lindegger, Bahnhofstr. 17, 7260 Davos Dorf, BFE-Projekt-Nr. 100985, BFE-Vertrag-Nr. 151155,
- Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Energie BFE, Jahresbericht 2005, 2. Dezember 2005, Projekt Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzeptes BOP-B, Philipp Brückmann, Iván Cyphelly, Markus Lindegger, Bahnhofstr. 17, 7260 Davos Dorf, BFE-Projekt-Nr. 100985, BFE-Vertrag-Nr. 151155, und
- Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Energie BFE, Druckluftspeicherung: Optimierung/Ausmessung bestehendes Projektmuster, Schlussbericht, 01.06.2007, Philipp Brückmann, Brückmann Elektronik (Projektleitung), Bahnhofstr. 17, 7260 Davos Dorf, Iván Cyphelly, Cyphelly & Cie (Versuche und Bericht), POB18, 2416 Les Brenets.

**[0004]** Die Hochdruck-Luftspeicherung nutzt die Energie, die in komprimierter Luft steckt. Zu Zeiten, zu denen beispielsweise mehr Strom produziert als verbraucht wird, kann mit der überschüssigen Energie Luft unter Druck in einen Speicher gepumpt werden. Bei Strombedarf wird die in der Druckluft gespeicherte Energie wieder in andere Formen von Energie, z. B. elektrischen Strom,

umgewandelt oder aber es werden Maschinen oder Fahrzeuge direkt angetrieben.

**[0005]** Verdichtung und Entspannung in höheren Druckbereichen (100 bis 300 bar) sind nach wie vor verlustbehaftete Vorgänge, da die Koppelung zwischen Erwärmung und Druckerhöhung (bzw. zwischen Abkühlung und Druckabbau) einen effizienten Betrieb verhindert und nur abschnittsweise zwischengekühlte adiabatische Vorgänge aneinandergereiht werden können. Die mehrstufigen Kompressoren mit einer Vielzahl von Ventilen und topologisch bedingten Toträumen erreichen demzufolge energetische Wirkungsgrade, die 50 % kaum überschreiten, und dies mit erheblichem Aufwand, wie z. B. mit hochdrucktauglichen Wärmetauschern für jede einzelne Stufe. Diese niedrigen Wirkungsgrade erschweren die Technik von Kompression und Entspannung zwecks Energiespeicherung in Hochdruckbehältern.

**[0006]** Um diese Problematik zu beseitigen, bedarf es eines Wärmetausches während der Druckänderung, damit ein annähernd isothermes Verhalten erzwungen werden kann, und dies noch kombiniert mit einer Ausschaltung der Toträume. Es sind diesbezüglich Problemlösungen bekannt, die dank mittelbarem Wärmetausch durch Sprühnebeleinspritzung in Schraubenkompressoren, Scrollkompressoren oder Flüssigkolbenkompressoren die Temperaturschwankungen begrenzen, wobei hier die Wärme zuerst auf die Tropfen übergeht und anschließend an einen außenstehenden Tauscher gelangt. Die Rückführung der Sprühnebel-Ausfällung aus dem Hochdruckbereich ist jedoch technisch aufwändig. Im motorischen Betrieb (Entspannung) muss noch ein zusätzlicher Flüssigkeitskreislauf die Sprühung sicherstellen, die wiederum im Auspuff ausgesondert werden muss, um in den Kreislauf zurückzukommen.

**[0007]** Eine herkömmliche Flüssigkolbenanordnung zur Verdichtung und Entspannung von Gasen mit einem Flüssigkolben, der durch einen von einer Flüssigkeit gebildeten Flüssigkeitsspiegel in einem Hochdruckraum verkörpert wird, ist aus der Druckschrift EP 2 273 119 B1 bekannt. Weitere herkömmliche Flüssigkolbenanordnungen sind in den Druckschriften DE 10 2008 042 828 A1, WO 2010 / 128 224 A1 und DE 44 30 716 A1 beschrieben.

**[0008]** Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, eine Flüssigkolbenanordnung für annähernd isotherme Vorgänge im höheren Druckbereich zu schaffen.

**[0009]** Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabenstellung wird durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst.

**[0010]** Die Erfindung wird nachfolgend in beispielhafter Weise unter Bezugnahme auf die Zeichnungen näher erläutert. In diesen zeigen:

55 Fig. 1 eine Flüssigkolbenanordnung mit zwei Flüssigkolben, zwei hydrostatischen Regeleinheiten und einem Niederdruckgenerator bzw. Entspanner;

- Fig. 2A bis 2D die Flüssigkolbenanordnung aus Fig. 1 während des Betriebs;
- Fig. 3A bis 3D eine Flüssigkolbenanordnung mit Messkolben als Mitnahme eines Vordruckkolbens während des Betriebs;
- Fig. 4 einen Schnitt durch ein Blechpaket aus Fig. 3A;
- Fig. 5 eine Flüssigkolbenanordnung mit zwei Gegentaktelelementen im Verbundbetrieb;
- Fig. 6 den Drehmomentverlauf als Resultat des Verbundbetriebs der Flüssigkolbenanordnung aus Fig. 5;
- Fig. 7A bis 7D eine Flüssigkolbenanordnung mit einem einzigen Weichenventil während des Betriebs; und
- Fig. 8 einen Teil einer Flüssigkolbenanordnung mit einer Wärmetauscherrolle gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung.

**[0011]** Die im Folgenden beschriebenen und in den Figuren schematisch dargestellten Flüssigkolbenanordnungen weisen Flüssigkolben auf, die jeweils ein Blechpaket mit festen Abständen zwischen den Blechen enthalten. Insbesondere füllt das Blechpaket den ganzen rechteckigen Flüssigkolben-Arbeitsraum aus. Die freie Oberfläche der Flüssigkeit zwischen den Blechen verkörpert dabei den Kolben. Das Blechpaket ist verschiebbar, um den an der oberen Paketseitenfläche befestigten Ventilkegel ohne Freiraum in den Blechen zu bewegen und zu führen für eine tottraumfreie Schaltung zwischen Niederdruckraum und Hochdruckraum. Im geschlossenen Zustand bleibt folglich kein Luft-Totraum im Hochdruckraum. Das Blechpaket nimmt die während den Arbeitszyklen entstehende Wärme auf. Da das Blechpaket bei jedem Hub vollständig umspült wird, bleibt es annähernd auf der Temperatur der Flüssigkeit. Von der Flüssigkeit wird die Wärme über einen Wärmetauscher an die Umwelt abgegeben.

**[0012]** Eine Ausgestaltung sieht vor, dass der rechteckige Hochdruckraum schräg angeordnet ist, wodurch der Niederdruck-Ventilkegel den Arbeitsraum eines Niederdruckkolbens mit dem Hochdruckraum in geschlossener Stellung totvolumenfrei absperren kann und die Stellung der Hochdruckventilklappe an der oberen Ecke des Blechpakets ein trichterartiges Zufießen bei Verdichtung erzwingt und somit aufwirbelnde Querströme verhindert.

**[0013]** Insbesondere verhindern die hier beschriebenen Flüssigkolbenanordnungen jeglichen Totraum, machen Hochdruck-Wärmetauscher überflüssig und si-

chern eine prozessgerechte Schaltgenauigkeit.

**[0014]** Die im Folgenden beschriebenen Plattentauscher sind in eine jeweilige kinematische Kette eingefügt, deren Verluste Welle/Luft oder Strom/Luft den erreichten Wirkungsgrad nicht wieder zunichtemachen. Es sind dabei topologische Ausgestaltungen vorgesehen, die insbesondere Lufteinschlüsse durch Verwirbelung und hohe Beschleunigungen, Reibungen durch Querkräfte und Alterung vermeiden, und zwar mittels harmonischem Zusammenspiel der Elemente des "flüssigen Pleuels".

**[0015]** Die in den Fig. 1 bis 8 gezeigten Flüssigkolbenanordnungen genügen insbesondere einer oder mehreren oder gar allen der folgenden Bedingungen:

1. Die Schaltung in Luft soll leckfrei sein, vorzugsweise mittels Sitzventilen zwischen Hochdruckzylinder und Vordruckraum sowie druckseitig zum Speicher, und außerdem vollständig tottraumfrei bleiben, um Verwirbelungen zu vermeiden.

2. Die Integrierung eines Niederdruckzylinders oder einer anderen Vordruckerzeugung sollen vorgesehen sein, denn eine ununterbrochene Kompression/Entspannung von 1 bar auf 200 bar würde gewaltige Ausmaße bedingen (diese einstufige Ausführung ist jedoch dank Platten-Tauscheffekt durchaus möglich).

3. Eine Untersetzung zwischen Welle und Kolbenbewegung soll gesichert sein, da die Hubfrequenz 1 bis 2 Hz nicht überschritten wird und die Welle mindestens 1500 Upm aufweisen sollte.

4. Die Untersetzung sowie die Hubbewegung sollen auf Lösungen verzichten, die Querkräfte und große Lagerkräfte bedingen (bei den langsamen Bewegungen der Kolben würde schon bei bescheidenen Leistungen die Wälzlager überfordert).

5. Um die Flüssigkeit im Betrieb aufzubereiten, soll das Pleuel/Kolben-Volumen periodisch über einen Tank drucklos umgewälzt werden, damit Blasen, Staub und Feuchtigkeit entfernt werden können.

6. Der Außentauscher soll niederdruckseitig angeschlossen sein, da geringstmögliche Temperaturdifferenzen mit der Umwelt angestrebt werden, die über Hochdruck-Rohrtauscher kaum mit vernünftigen Aufwand zu erzielen sind. Außerdem kann somit ein einziger Außentauscher auch mehrkolbige Anlagen bedienen.

7. Die Kolben-Bewegungsumsteuerung soll mit geringen Beschleunigungen geschehen, vornehmlich gemäß einer vorgegebenen Geschwindigkeitskurve, die eine Glättung der Druck- bzw. Drehmomentpulsationen bei Verbundanordnungen ermöglicht.

8. Es soll verhindert werden, dass bei Lösungen mit hin- und hergehenden Kolben ein Totraum entsteht, der im Betrieb nicht genügend durchspült wird und somit Verunreinigungen und Wärme speichert.

**[0016]** Fig. 1 zeigt schematisch eine Flüssigkolbenanordnung 1 für die quasi-isotherme Verdichtung und Entspannung von Gasen mit zwei Flüssigkolben 2a, 2b. Aufgrund des gleichen Aufbaus der beiden Flüssigkolben 2a, 2b können die einander entsprechenden Elemente der Flüssigkolben 2a, 2b, wie z. B. Hochdruckräume, Blechpakete usw., mit Zahlwörtern ("erstes Element" bzw. "zweites Element") versehen werden, wie dies in den nachfolgenden Patentansprüchen der Fall ist. Der Übersichtlichkeit halber wird jedoch in der Beschreibung auf die Zahlwörter verzichtet.

**[0017]** Die Flüssigkolben 2a, 2b umfassen jeweils einen Hochdruckraum 3a, 3b sowie ein in dem Hochdruckraum 3a, 3b gelagertes Blechpaket 4a, 4b. Die Blechpakete 4a, 4b bestehen jeweils aus einer Mehrzahl von Blechen, die insbesondere parallel zueinander angeordnet sind. Ferner können die Bleche eines Blechpakets 4a, 4b äquidistant angeordnet sein und insbesondere einen Abstand zwischen zwei benachbarten Blechen im Bereich von 0,3 bis 0,8 mm aufweisen. Ein Flüssigkeitsspiegel 5a, 5b in den jeweiligen Hochdruckräumen 3a, 3b und zwischen den Blechen der Blechpakete 4a, 4b verkörpert den jeweiligen Kolben.

**[0018]** Die Blechpakete 4a, 4b sind in den Hochdruckräumen 3a, 3b verschiebbar gelagert, um die an ihren Oberseiten befestigten Niederdruck-Ventilkegel 6a, 6b zwangszusteuern, wodurch Niederdruckventile 7a, 7b geöffnet oder geschlossen werden. Die Unterseiten der Blechpakete 4a, 4b sind an federbelasteten Steuerkolben 8a, 8b befestigt, durch welche die Blechpakete 4a, 4b in den Hochdruckräumen 3a, 3b verschoben werden können.

**[0019]** Die Flüssigkolbenanordnung 1 umfasst ferner einen Niederdruckgenerator bzw. Entspanner 10, der z. B. als reversierbare Scroll-Einheit oder Kreiselläufer ausgestaltet sein kann. Der Niederdruckgenerator bzw. Entspanner 10 ist über eine Luftleitung 11 mit den Niederdruckventilen 7a, 7b verbunden, um in den Hochdruckräumen 3a, 3b einen Vordruck erzeugen zu können. Der andere Anschluss des Niederdruckgenerators bzw. Entspanners 10 ist mit einem Saugfilter und/oder Schalldämpfer 12 bestückt. Der Niederdruckgenerator bzw. Entspanner 10 ist auf eine Welle 13 montiert und wird von dieser angetrieben.

**[0020]** Des Weiteren sind zwei variable, im Gegentakt arbeitende hydrostatische Einheiten 14a und 14b vorgesehen, die ebenfalls von der Welle 13 angetrieben werden können oder aber im motorischen Betrieb die Welle 13 antreiben können. Die hydrostatischen Einheiten 14a, 14b sind über Leitungen 15a, 15b mit den Hochdruckräumen 3a, 3b verbunden, so dass sie Flüssigkeit in die Hochdruckräume 3a, 3b einspeisen bzw. diesen entnehmen können. Darüber hinaus steuert die hydrostatische

Einheit 14a den Steuerkolben 8b über eine Leitung, und die hydrostatische Einheit 14b steuert den Steuerkolben 8a über eine Leitung 16b. Wenn die Steuerkolben 8a, 8b über die Leitungen mit einem Hochdruck beaufschlagt werden, drücken diese die Blechpakete 4a, 4b nach unten und öffnen dadurch die Niederdruckventile 7a, 7b. Demgegenüber haben nicht beaufschlagte Leitungen aufgrund der in den Steuerkolben 8a, 8b enthaltenen Federn geschlossene Niederdruckventile 7a, 7b zur Folge.

**[0021]** In ein Stellglied 20 kann eine Drehzahlvorgabe 21 eingegeben werden, aus welcher das Stellglied 20 zusammen mit der jeweiligen Drehzahl  $\omega$  der Welle 13 und der Fördervolumeneinstellung  $\alpha$  der hydrostatischen Einheiten 14a, 14b die effektive Flüssigkeitseinspeisung bzw. -entnahme durch die Leitungen 15a, 15b berechnet, wobei der Anschlag der jeweiligen Hochdruckventilklappe 31a, 31b auf die Magnetspule 33a bzw. 33b das unentbehrliche Synchronisierungssignal ("reset") liefert.

**[0022]** Wie Fig. 1 zeigt sind die hydrostatischen Einheiten 14a, 14b mit einem Behälter 22 über Filter 23a, 23b, einen äußeren Wärmetauscher 24 und Rückschlagventile 25 verbunden.

**[0023]** Neben den Niederdruckventilen 7a, 7b sind Hochdruckventile 30a, 30b an den Hochdruckräumen 3a, 3b angeordnet. Die Hochdruckventile 30a, 30b bestehen aus Hochdruckventilklappen 31 a, 31 b, die in Hohlräumen 32a, 32b angeordnet sind und von Magnetspulen 33a, 33b gesteuert werden können. Über Leitungen 34a, 34b bestehen Verbindungen von den Hochdruckventilen 30a, 30b zu einem Speicherraum 35.

**[0024]** Die Funktionsweise der Flüssigkolbenanordnung 1 wird nachfolgend anhand der Fig. 2A bis 2D erläutert, wobei zwischen zwei Betriebsmodi der Flüssigkolbenanordnung 1 unterschieden wird. In einem ersten Betriebsmodus, der schematisch in den Fig. 2A und 2B dargestellt ist, wird Gas unter Aufbringung von Energie verdichtet. In einem zweiten Betriebsmodus, der schematisch in den Fig. 2C und 2D dargestellt ist, wird das Gas wieder entspannt und die dabei freigesetzte Energie in eine Bewegung der Welle 13 umgesetzt.

**[0025]** In den Fig. 2A bis 2D wie auch allen anderen Figuren symbolisieren Dreiecke die Flussrichtung der Flüssigkeit in den jeweiligen Leitungen. Ausgefüllte Dreiecke kennzeichnen einen Hochdruckbereich, nicht-ausgefüllte Dreiecke einen Niederdruckbereich. Durchflusslose Leitungen sind gestrichelt dargestellt.

**[0026]** Bei der in den Fig. 2A und 2B gezeigten Verdichtung des Gases, beispielsweise Luft, wird zunächst mit Hilfe des von dem Niederdruckgenerator bzw. Entspanner 10 bereitgestellten Drucks ein Vordruck in dem jeweiligen Hochdruckraum 3a, 3b geschaffen. Anschließend wird dieser Druck erhöht, indem Flüssigkeit in den Hochdruckraum 3a, 3b gepumpt wird. Sobald der in dem Speicherraum 35 herrschende Druck erreicht ist, öffnet sich das Hochdruckventil 30a, 30b und es kann eine Druckerhöhung in dem Speicherraum 35 erzielt werden.

**[0027]** Die Fig. 2A und 2B zeigen die beiden Stellungen der durch die Steuerkolben 8a, 8b gesteuerten Blechpa-

kete 4a, 4b. In Fig. 2A ist das Blechpaket 4a in der oberen Position, so dass das Niederdruckventil 7a geschlossen ist, wohingegen sich das Blechpaket 4b in der unteren Position befindet und das Niederdruckventil 7b dementsprechend geöffnet ist. In Fig. 2B sind die Positionen der Blechpakete 4a, 4b genau vertauscht.

**[0028]** Fig. 2A zeigt, dass die hydrostatische Einheit 14a über den Filter 23a Flüssigkeit aus dem Behälter 22 fördert und die Flüssigkeit weiter in den Hochdruckraum 3a pumpt, was dort einen steigenden Flüssigkeitsspiegel 5a zur Folge hat. In der vorangehenden Arbeitsphase war im Hochdruckraum 3a mittels des Niederdruckgenerators bzw. Entspanners 10 ein Vordruck von z. B. 1 bis 6 bar erzeugt worden. Aufgrund des steigenden Flüssigkeitsspiegels 5a erhöht sich nun dieser Druck sukzessive. Sobald in dem Hochdruckraum 3a der gleiche Druck wie im Speicherraum 35 herrscht, öffnet sich das Hochdruckventil 30a und es kann eine Einspeisung in den Speicherraum 35 stattfinden.

**[0029]** Zur gleichen Zeit wird die in dem Hochdruckraum 3b enthaltene Flüssigkeit von der hydrostatischen Einheit 14b über den Wärmetauscher 24 in den Behälter 22 gepumpt. Da das Niederdruckventil 7b geöffnet ist, herrscht in dem Hochdruckraum 3b der von dem Niederdruckgenerator bzw. Entspanner 10 erzeugte Vordruck.

**[0030]** Anschließend werden die Steuerkolben 8a, 8b umgeschaltet, so dass sich die Positionen der Blechpakete 4a, 4b und damit der Niederdruck-Ventilkegel 7a, 7b wie in Fig. 2B dargestellt ergeben.

**[0031]** Während der in Fig. 2B dargestellten Arbeitsphase wird die zuvor in den Hochdruckraum 3a gepumpte Flüssigkeit von der hydrostatischen Einheit 14a wieder abgepumpt und fließt über den Wärmetauscher 24 in den Behälter 22. Über das geöffnete Niederdruckventil 7a erzeugt der Niederdruckgenerator bzw. Entspanner 10 den Vordruck im Hochdruckraum 3a.

**[0032]** Im Hochdruckraum 3b steigt währenddessen der Flüssigkeitsspiegel 5b aufgrund der von der hydrostatischen Einheit 14b aus dem Behälter 22 zugeführten Flüssigkeit. Sobald im Hochdruckraum 3b der Druck des Speicherraums 35 erreicht ist, öffnet sich das Hochdruckventil 30b und das Gas im Speicherraum 35 wird weiter verdichtet.

**[0033]** Danach wird der aus den beiden in den Fig. 2A und 2B gezeigten Arbeitsphasen bestehende Zyklus wiederholt, wodurch ein gewünschter Druck im Speicherraum 35 im Bereich von beispielsweise 200 bis 300 bar erzeugt werden kann. Die Energie, die zum Erzeugen dieses Drucks aufgewendet worden ist, kann im sogenannten motorischen Betrieb in eine Bewegung der Welle 13 umgewandelt werden.

**[0034]** Die beiden Arbeitsphasen des motorischen Betriebs sind in den Fig. 2C und 2D dargestellt. In Fig. 2C drückt der Steuerkolben 8a das Blechpaket 4a in die obere Position, so dass das Niederdruckventil 7a geschlossen ist, wohingegen sich das Blechpaket 4b in der unteren Position befindet und das Niederdruckventil 7b dementsprechend geöffnet ist. In Fig. 2D sind die Positionen

der Blechpakete 4a, 4b genau vertauscht.

**[0035]** An den Rücken der Hochdruckventilklappen 31a, 31b sind Stahlscheiben angebracht, durch welche sich die Hochdruckventile 30a, 30b mit Hilfe der Magnetspulen 33a, 33b beeinflussen lassen und zwar so, dass solange über die Anschlussdrähte der Magnetspulen 33a, 33b ein Strom fließt, die Hochdruckventilklappen 31a, 31b nach dem Öffnen in offener Stellung gehalten werden zwecks Erhaltung des Vordruckes mittels genauer Dosierung.

**[0036]** Im motorischen Betrieb kann durch das gezielte Öffnen und Schließen der Hochdruckventile 30a, 30b der zuvor im Speicherraum 35 erzeugte Druck den Hochdruckräumen 3a, 3b zugeführt werden. Wie Fig. 2C zeigt, wird durch den im Hochdruckraum 3a erzeugten Hochdruck die Welle 13 über die hydrostatische Einheit 14a angetrieben. Die Flüssigkeit, die dabei aus dem Hochdruckraum 3a gedrückt wird, fließt über die hydrostatische Einheit 14a und den äußeren Wärmetauscher 24 in den Behälter 22. Zur gleichen Zeit pumpt die hydrostatische Einheit 14b Flüssigkeit aus dem Behälter 22 in den Hochdruckraum 3b, in dem der Niederdruckgenerator bzw. Entspanner 10 über das geöffnete Niederdruckventil 7b den Vordruck erzeugt. Die Energie, die zum Betrieb der hydrostatischen Einheit 14b und des Niederdruckgenerators bzw. Entspanners 10 aufgewendet wird, stammt dabei letztlich aus der Energie, die von der hydrostatischen Einheit 14a auf die Welle 13 übertragen worden ist. Ferner können weitere Maschinen von der Welle 13 angetrieben werden, beispielsweise ein Generator zur Stromerzeugung.

**[0037]** Während der in Fig. 2D gezeigten Arbeitsphase sind die Funktionalitäten der beiden Flüssigkolben 2a, 2b genau umgekehrt wie in Fig. 2C. Durch das gezielte Öffnen und Schließen des Hochdruckventils 30b wird ein Hochdruck im Hochdruckraum 3b geschaffen, welcher die von der hydrostatischen Einheit 14b zuvor in den Hochdruckraum 3b gepumpte Flüssigkeit wieder zurückpresst. Dadurch wandelt die hydrostatische Einheit 14b einen Teil der im Speicherraum 35 gespeicherten Energie in eine Bewegung der Welle 13 um. Ein Teil dieser Energie wiederum wird von der hydrostatischen Einheit 14a und dem Niederdruckgenerator bzw. Entspanner 10 verwendet, um Flüssigkeit aus dem Behälter 22 in den Hochdruckraum 3a zu pumpen und um den Vordruck im Hochdruckraum 3a zu erzeugen. Anschließend wird der aus den in den Fig. 2C und 2D gezeigten Arbeitsphasen bestehende Zyklus wiederholt.

**[0038]** Die Blechpakete 4a, 4b in den Hochdruckräumen 3a, 3b fungieren als Wärmetauscher und gewährleisten einen annähernd isothermen Betrieb auch in höheren Druckbereichen. Die bei der Verdichtung und Entspannung entstehenden Temperaturschwankungen werden in den Hochdruckräumen 3a, 3b von der Luft auf die Blechplatten der Blechpakete 4a, 4b übertragen und von diesen auf die Flüssigkeit, die die Blechpakete 4a, 4b umspült. Von der Flüssigkeit werden schließlich die Temperaturschwankungen über den äußeren Wärme-

tauscher 24 an die Umwelt abgegeben.

**[0039]** Die in Fig. 1 gezeigte Flüssigkolbenanordnung 1 ist eine Basisausführung einer Gegentaktschaltung, die ohne Messkolben alle oben genannten Bedingungen erfüllt, allerdings mit zwei hydrostatischen Einheiten 14a, 14b und mit dem separaten Niederdruckgenerator bzw. Entspanner 10, was bezüglich Preis und Wirkungsgrad nicht das Optimum darstellt (im Verbundbetrieb wären es vier hydrostatische Einheiten, wobei ein einziger Niederdruckgenerator bzw. Entspanner genügen würde). Aus dieser Basisausführung lassen sich alle weiteren im Folgenden beschriebenen Flüssigkolbenanordnungen ableiten.

**[0040]** Fig. 3A zeigt schematisch eine Flüssigkolbenanordnung 50 mit zwei Messkolben als Mitnahme eines Vordruckkolbens, wodurch eine zweite hydrostatische Einheit und der Niederdruckgenerator bzw. Entspanner entbehrlich werden, allerdings unter Zuhilfenahme eines Umsteuerventils und einer Umwälzpumpe in der Aufbereitungseinheit, wie nachfolgend beschrieben wird. Verschiedene Betriebszustände der Flüssigkolbenanordnung 50 sind in den Fig. 3A bis 3D dargestellt.

**[0041]** Ähnlich wie die Flüssigkolbenanordnung 1 aus Fig. 1 weist die Flüssigkolbenanordnung 50 zwei Flüssigkolben 51a, 51b auf, die jeweils einen Hochdruckraum 52a, 52b sowie ein in dem Hochdruckraum 52a, 52b gelagertes Blechpaket 53a, 53b umfassen.

**[0042]** In der vorliegenden Ausgestaltung bestehen die Blechpakete 53a, 53b aus Blechstapeln, die mittels federbelasteten Steuerkolben 54a, 54b in der Längsachse verschiebbar in den Hochdruckräumen 52a, 52b gelagert sind. Die Bewegung der Blechpakete 53a, 53b bestimmt die Bewegung von Niederdruck-Ventilkegeln 55a, 55b und somit das Öffnen und Schließen von Niederdruckventilen 56a, 56b, da die Niederdruck-Ventilkegel 55a, 55b fest mit dem jeweiligen Blechstapel an der oberen Stapelfläche verbunden sind.

**[0043]** Die Blechplatten der Blechpakete 53a, 53b können mit einer Abstandsnopplung 57a, 57b oder sonstigen Einlagen versehen sein, durch die der Abstand zwischen den Blechplatten vorgegeben wird. Insbesondere können die Abstände zwischen zwei jeweils benachbarten Blechplatten in den Blechpaketen 53a, 53b konstant sein. Die Blechplatten können parallel zueinander ausgerichtet sein, und der Abstand zwischen benachbarten Blechplatten beträgt insbesondere zwischen 0,3 und 0,8 mm. Die Blechpakete 53a, 53b können die Form eines Rechteck-Prismas haben, wie dies schematisch in Fig. 4 gezeigt ist, die einen Schnitt des Blechpakets 53a im Zylinderblock 58a entlang der in Fig. 3A eingezeichneten Linie A-A', d. h. einen Schnitt senkrecht zur Längsachse des Blechpakets 53a, zeigt. Die Blechpakete 53a, 53b füllen den jeweiligen Hochdruckraum 52a, 52b senkrecht zur Längsachse, d. h. in der in Fig. 4 gezeigten Ebene, vollständig aus.

**[0044]** Die Niederdruckventile 56a, 56b verbinden sinngemäß die Vordruckräume 59a, 59b des Vordruckkolbens 60 mit den jeweiligen Hochdruckräumen 52a,

52b. Die Zylinderblöcke 58a, 58b, in denen sich die jeweiligen Hochdruckräume 52a, 52b befinden, beinhalten auch den Sitz der Hochdruckventilklappen 65a, 65b der Hochdruckventile 66a, 66b. Die Hochdruckventilklappen 65a, 65b sind in einem jeweiligen Hohlraum 67a, 67b zusammen mit Haftmagnetspulen 68a, 68b angeordnet und werden von diesen koaxial geführt.

**[0045]** Der jeweilige Flüssigkolbenspiegel 70a, 70b wird durch einen am Flüssigkeitsanschluss 71a, 71b angekoppelten Messkolben 72a, 72b bewegt, der auch den Vordruckkolben 60 mitnimmt (die Messkolben 72a, 72b und der Vordruckkolben 60 sind über eine Stange miteinander verbunden) und bei jedem Hub ein vollständiges Umspülen des jeweiligen Blechpakets 53a, 53b bewirkt und somit einen mittelbaren Tausch mit einem äußeren Wärmetauscher 75. Dieser Strom fließt durch ein 7/2-Wege-Weichenventil 76a, 76b, das einen drucklosen Kreis mit dem äußeren Wärmetauscher 75, einem Filter 77 und einem Vorratsbehälter 78 bedient. Diese Anordnung erlaubt einen einwandfreien Austausch der Kolbenflüssigkeit bei jedem Hub, da diese je nach Fließrichtung entweder direkt vom - wie in Fig. 3A auf der linken Seite beispielhaft gezeigt - Blechstapel 53a zum Messkolben 72a über ein Austauschvolumen 80a und ein Rückschlagventil 81a strömt, bei Bewegung des Messkolbens 72a nach links (Niederdruckverdichtung), entsprechend der dargestellten Schieberstellung des 7/2-Wege-Weichenventils 76a, oder bei Hochdruckverdichtung - wie in Fig. 3B auf der rechten Seite beispielhaft gezeigt - vom Messkolben 72b zurück in den Hochdruckraum 52b über ein Rückschlagventil 82b, wobei der Schieber des 7/2-Wege-Weichenventils 76b in die druckseitige Sperrstellung für das Austauschvolumen 80b geschoben wird und hiermit eine Pumpe 85 dank der Freigabe der entsprechenden Anschlüsse während dieses Hubes die Flüssigkeit des Austauschvolumens 80b umwälzen kann (das Umwälzen der in einem der Austauschvolumen 80a, 80b enthaltenen Flüssigkeit mittels der Pumpe 85 ist in den Fig. 3A bis 3D durch mit gestrichelten Linien ausgefüllte Dreiecke dargestellt.).

**[0046]** Bei der in Fig. 3A dargestellten Arbeitsphase ist ein an dem Vordruckraum 59a tottraumfrei angeordnetes Saug-/Auspuflventil 86a geschlossen, um den benötigten Vordruck im Vordruckraum 59a zu erzeugen. Zur gleichen Zeit ist ein an dem Vordruckraum 59b tottraumfrei angeordnetes Saug-/ Auspuflventil 86b geöffnet, damit ein Druckausgleich in dem Vordruckraum 59b mit der Umgebung stattfinden kann. Die Saug-/Auspuflventile 86a, 86b werden jeweils mittels eines Steuerkolbens geöffnet und geschlossen.

**[0047]** Die Messkolben 72a, 72b sind in den jeweiligen hydraulischen Pfad zwischen der steuerbaren hydrostatischen Einheit 87 und dem 7/2-Wege-Weichenventil 76a, 76b eingefügt und gehorchen somit den mechanisch oder elektronisch eingprägten modifizierten Sinus-Geschwindigkeitsprofilen, welche die Beschleunigung der Flüssigkolbenspiegel 70a, 70b begrenzen.

**[0048]** Die Betriebsflüssigkeit soll vorzugsweise einen

sehr geringen Dampfdruck aufweisen, wie z. B. Wasser oder eine ionische Flüssigkeit aus der Methylimidazolium-Gruppe und insbesondere die hydrophobe ionische Flüssigkeit 1-Ethyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethyl-sulfonyl)amid (EMIM BTA), da hiermit die Löslichkeit von Luft unter Druck minimal ist und das Kondenswasser problemlos ausgesondert wird.

**[0049]** Da in der in Fig. 3A gezeigten Topologie (unechte Zweistufigkeit ohne Zwischendruckraum) die Hochdruckräume 53a, 53b immer unter Druck bleiben (bei Niederdruckverdichtung oder Entspannung zwischen 1 bar und dem Volumenverhältnis von Niederdruckraum 59a, 59b zu Hochdruckraum 53a, 53b, bei Hochdruckverdichtung oder Entspannung zwischen eben diesem Verhältnis und dem Speicherdruck) ist die Umwälzung mittels Weichenventil praktisch unumgänglich (bis auf die Lösung mit zwei hydrostatischen Einheiten), da ansonsten ein eingeschlossenes Volumen hin und her pendeln würde ohne Entlüftungs- und Reinigungsmöglichkeit und mit einem Wärmetausch nur durch die Wand von Hochdruckrohren, was ja ein Nachteil der mehrstufigen teiladiabatischen Kompressoren ist.

**[0050]** Die hier gewählte pseudo-Zweistufigkeit vereinfacht die Ventiltechnik maßgeblich, müssen doch im motorischen Betrieb nur noch die Hochdruckventile 66a, 66b in Abhängigkeit mehrerer Betriebsparameter angesteuert werden, wogegen die Schaltung der Niederdruckventile 56a, 56b über die Steuerkolben 54a, 54b synchron mit dem jeweiligen Saug-/ Auspuffventil 86a, 86b über seinen Steuerkolben durch die Richtungsumkehr des Messkolbens 72a, 72b bzw. die Umkehrung des Stromes einer hydrostatischen Einheit 87 an den Totpunkten eingeleitet wird. Mit dieser Anordnung lassen sich also höchste Drücke mit nur zwei "unechten" Stufen bewältigen (bzw. mit einer kleinen Vorstufe von 5 bis 6 bar und der Hauptstufe von 200 bis 300 bar, wobei das jeweilige Blechpaket 53a, 53b immer in Verbindung mit beiden Arbeitsräumen bleibt), was eine markante Wirkungsgradverbesserung gegenüber den üblichen 4- oder 5-kolbigen Maschinen bedeutet.

**[0051]** Die hydrostatische Einheit 87 wird von einer Steuereinheit 88 angesteuert, welche wiederum von einer auf einem Prozessor oder einer anderen Recheneinheit ablaufenden Software gesteuert wird.

**[0052]** Die Hochdruckventilklappen 65a, 65b erfüllen eine komplexe Aufgabe, insbesondere im Falle des motorischen Betriebs, denn hier ist der Schaltpunkt nicht an die Totpunkte gebunden und muss im motorischen Fall mittels Rechner und Sensoren ermittelt werden. Das Arbeiten mit einem Flüssigkolben erlaubt ja die Festsetzung des oberen Fördertotpunkts des jeweiligen Messkolbens 72a, 72b über die Ventilsitzebene hinweg, die Flüssigkeit wird lediglich die Hochdruckventilklappe 65a, 65b umspülen und den Hohlraum 67a, 67b teilweise auffüllen. Damit die Flüssigkeit nach dem Totpunkt wieder abfließen kann, muss die Schließung der jeweiligen Hochdruckventilklappe 65a, 65b derart verzögert werden, dass der Flüssigkolbenspiegel 70a, 70b die Sitze-

bene genau in dem Augenblick passiert, in dem die Hochdruckventilklappe 65a, 65b auf ihren Sitz auftrifft. Somit wird ein totvolumenfreier Verdichterbetrieb garantiert, der technisch relativ einfach realisierbar ist, indem man die Hochdruckventilklappen 65a, 65b schwimmbar gestaltet, was die gewünschte Verzögerung automatisch herbeiführt. Anders sieht es beim motorischen Betrieb aus, denn hier muss nach der Öffnung der jeweiligen Hochdruckventilklappe 65a, 65b, die durch den versetzten Flüssigkolbentotpunkt mittels Anhebung eingeleitet wird, der Durchgang eine Weile frei bleiben, nachdem der Flüssigkolbenspiegel 70a, 70b die Sitzebene passiert hat (Verschiebevolumen-Einspeisung). Dies wird dadurch erreicht, dass die am Rücken der jeweiligen Hochdruckventilklappe 65a, 65b angebrachte Stahlscheibe, die nach dem Öffnen am Haftmagnet anliegt, und die Haftkraft die Hochdruckventilklappe 65a, 65b in offener Stellung halten, solange über die Anschlussdrähte der Haftmagnetspule 68a, 68b ein Strom fließt. Die Steuerung der Haftmagnetspulen 68a, 68b wird von einer Steuereinheit vorgenommen, beispielsweise dem Prozessor.

**[0053]** Wohl sind andere Betätigungsarten an dieser Stelle denkbar, aber der Weg über den Haftmagneten erlaubt zusätzlich die genaue Erfassung des Öffnungszeitpunkts dank der Veränderung des Spulenstromes im Augenblick des Anschlags der Stahlscheibe auf die jeweilige Haftmagnetspule 68a, 68b, die als Signal zwecks genauer Bestimmung des aktiven Flüssigkeitsüberschusses und entsprechender Steuerung dienen kann, und zwar über die Messung der Zeitspanne zwischen Anschlag und Totpunkt. Außerdem ist diese Lösung energetisch außerordentlich sparsam trotz schnellem Ventilschließen. Diese Vorteile werden allerdings durch die Notwendigkeit erkauft, beim Start jeweils einige Kompressorhübe auszuführen, bevor der motorische Betrieb eingeleitet wird.

**[0054]** Während in Fig. 3A gezeigt ist, wie bei der Verdichtung des Gases ein Hochdruck im Hochdruckraum 52b erzeugt wird, ist in Fig. 3B die Hochdruckverdichtung des Gases im Hochdruckraum 52a dargestellt (der Speicherraum, in dem das verdichtete Gas gespeichert wird, ist in den Fig. 3A bis 3D der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt, jedoch sind die Anschlüsse für den Speicherraum an den Hochdruckventilen 66a, 66b gezeigt). Während der in Fig. 3B gezeigten Arbeitsphase werden die Steuerkolben 54a, 54b derart angesteuert, dass das Niederdruckventil 56a geschlossen ist, d. h., das Blechpaket 53a befindet sich in der oberen Position, und das Niederdruckventil 56b geöffnet ist, d. h., das Blechpaket 53b befindet sich in der unteren Position. Die in der rechten Kammer des Messkolbens 72a befindliche Flüssigkeit wird von der hydrostatischen Einheit 87 über das Rückschlagventil 82a in den Hochdruckraum 52a gepumpt, wodurch dort ein Hochdruck erzeugt wird. Gleichzeitig wird die im Hochdruckraum 52b befindliche Flüssigkeit über das 7/2-Wege-Weichenventil 76b und das Rückschlagventil 81b in die linke Kammer des Messkolbens

72b gefördert.

**[0055]** Bei der in Fig. 3B dargestellten Arbeitsphase ist das Saug-/Auspuffventil 86a geöffnet, damit ein Druckausgleich in dem Vordruckraum 59a mit der Umgebung stattfinden kann. Zur gleichen Zeit ist das Saug-/Auspuffventil 86b geschlossen, um den benötigten Vordruck im Vordruckraum 59b zu erzeugen.

**[0056]** Die in dem Austauschvolumen 80a befindliche Flüssigkeit wird in Fig. 3B von der Pumpe 85 umgewälzt. Dabei wird beispielsweise das Austauschvolumen 80a in den Vorratsbehälter 78 entleert und neue Flüssigkeit aus dem Vorratsbehälter 78 in das Austauschvolumen 80a gepumpt.

**[0057]** Die Fig. 3C und 3D zeigen die beiden Arbeitsphasen bei der Entspannung des Gases, d. h. dem motorischen Betrieb, bei dem die in dem verdichteten Gas gespeicherte Energie von der hydrostatischen Einheit 87 oder daran angeschlossenen Einheiten in andere Energieformen, z. B. elektrische Energie oder mechanische Arbeit, umgewandelt wird.

**[0058]** Fig. 3C zeigt eine Arbeitsphase, bei der das Niederdruckventil 56a geöffnet ist und das Niederdruckventil 56b geschlossen ist. Ferner sind die Saug-/Auspuffventile 86a, 86b geschlossen bzw. geöffnet. Über das geöffnete Hochdruckventil 66b wird der zunächst mit der Flüssigkeit gefüllte Hochdruckraum 52b mit dem im Speicherraum vorliegenden Druck beaufschlagt. Dadurch wird Flüssigkeit aus dem Hochdruckraum 52b über das 7/2-Wege-Weichenventil 76b, das Austauschvolumen 80b und das Rückschlagventil 81b in die linke Kammer des Messkolbens 72b geführt. Der Messkolben 72b bewegt sich somit nach rechts und treibt die hydrostatische Einheit 87 an.

**[0059]** Durch die Kopplung des Messkolbens 72a an den Messkolben 72b wird die Flüssigkeit aus der rechten Kammer des Messkolbens 72a, über das 7/2-Wege-Weichenventil 76a und das Rückschlagventil 82a in den Hochdruckraum 52a gepumpt, in dem über das geöffnete Niederdruckventil 56a mittels des ebenfalls an den Messkolben 72b gekoppelten Vordruckkolbens 60 der Vordruck erzeugt wird.

**[0060]** Die in dem Austauschvolumen 80a befindliche Flüssigkeit wird in Fig. 3C von der Pumpe 85 umgewälzt.

**[0061]** In Fig. 3D ist die zweite Arbeitsphase im motorischen Betrieb gezeigt. Hier ist das Niederdruckventil 56a geschlossen, und das Niederdruckventil 56b ist geöffnet. Ferner sind die Saug-/Auspuffventile 86a, 86b geöffnet bzw. geschlossen. Über das geöffnete Hochdruckventil 66a wird der zunächst mit Flüssigkeit gefüllte Hochdruckraum 52a mit dem im Speicherraum vorliegenden Druck beaufschlagt. Dadurch wird Flüssigkeit aus dem Hochdruckraum 52a über das 7/2-Wege-Weichenventil 76a, das Austauschvolumen 80a und das Rückschlagventil 81a in die rechte Kammer des Messkolbens 72a gepresst. Der Messkolben 72a bewegt sich somit nach links und treibt die hydrostatische Einheit 87 an.

**[0062]** Durch die Kopplung des Messkolbens 72b an den Messkolben 72a wird die Flüssigkeit aus der linken

Kammer des Messkolbens 72b über das Rückschlagventil 82b in den Hochdruckraum 52b gepumpt, in dem über das geöffnete Niederdruckventil 56b mittels des ebenfalls an den Messkolben 72a gekoppelten Vordruckkolbens 60 der Vordruck erzeugt wird.

**[0063]** Die in dem Austauschvolumen 80b befindliche Flüssigkeit wird in Fig. 3D von der Pumpe 85 umgewälzt.

**[0064]** Anschließend wird der Zyklus, wie in den Fig. 3C und 3D dargestellt, wiederholt.

**[0065]** Die Einfachheit der in Fig. 1 gezeigten Grundschaltung wird durch die Komplexität der Erfassung des Hubverlaufs und durch den zusätzlichen Einsatz einer hydrostatischen Einheit samt Niederdruckgenerator bzw. Entspanner erkauft, was preislich und wirkungsgradmäßig Nachteile bringen kann, obschon bei größeren Anlagen, die aus vielen Hochdruck-Flüssigkolbenräumen in parallelen Strängen zusammengesetzt werden, ein einziger Vordruckapparat alle Stränge bedienen kann. Insofern ist das in Fig. 3A dargestellte Gegentaktelelement mit einfachem Messkolben eher für kleine Systeme geeignet, da lediglich zu den zwei Flüssigkolben zwei Hydroweichen, zwei Messkolben mit dazwischenliegendem Vordruckkolben und einer Umwälzpumpe addiert werden müssen, um ein autonomes Gegentaktelelement zu bilden, das durch Verdoppelung zu einer pulsationsarmen Verbundeinheit wird.

**[0066]** Obschon zumindest für Verdichtungszwecke der Einsatz eines einzigen Kolbenaufbaus gemäß Fig. 1 sinnvoll sein kann, empfiehlt sich für motorische Zwecke (Entspannungsbetrieb) eine Flüssigkolbenanordnung mit vier Flüssigkolben, wie sie schematisch in Fig. 5 gezeigt ist. Die vier Kolben ermöglichen eine kompakte drehzahlsteuerbare Einheit mit geringen Drehmomentpulsationen, deren Charakteristiken sich in dem in Fig. 6 dargestellten Diagramm offenbaren.

**[0067]** Die Flüssigkolbenanordnung umfasst zwei Gegentaktelemente 101 und 101' mit Messkolben 102a, 102b, 102a', 102b', die über Kreuz mit je einer variablen hydrostatischen Einheit 103, 103' an einer gemeinsamen Welle 115 hydraulisch verbunden sind. Jedes der Gegentaktelemente 101, 101' enthält zwei Flüssigkolben, die im Gegentakt betrieben werden. Die Gegentaktelemente 101, 101' erzeugen durch Rückkoppelung der Schluckvolumenverstellungen 104, 104' zum Messkolbenhub einen in Fig. 6 gezeigten Schluckvolumenverlauf  $Q_{(V1)} + Q_{(V2)}$ , der einer leicht modifizierten Sinuskurve entspricht. Die beiden Schluckvolumenverläufe  $Q_{(V1)}$  und  $Q_{(V2)}$  sind um einen halben Hub im Gegentakt gegeneinander verschoben. Über die Druckbeaufschlagung  $p_{(V)}$  des Schluckvolumens entsteht sinngemäß das Einzeldrehmoment der jeweiligen Einheit  $M_{(V1)}$ ,  $M_{(V2)}$  und durch die Summe der verschobenen Einzeldrehmomente der Drehmomentverlauf M. Wir sehen also, dass sich durch den Schluckvolumenverlauf  $Q_{(V)}$  die Hyperbeldruckspitze "herausfiltern" lässt, was ja ein bekanntes Hindernis bei Druckluftantrieben darstellt.

**[0068]** Fig. 5 zeigt außerdem die Vielseitigkeit des Weichenventil-Konzepts mit der Anordnung einer einzigen

Aufbereitungseinheit 105 in Verbindung mit den jeweiligen Weichenventilgehäusen 106, 106' und den Austauschbehältern 107, 107' an den vier Flüssigkolbengehäusen 108a, 108b, 108a', 108b'.

**[0069]** Die Flüssigkolbenanordnung ist außerdem geeignet, anhand rein mechanischen Gliedern die Drehzahlverstellung mit "eingepprägtem Druck" (so nennt man die Drehzahlregelung ab Druckquelle, wobei das Drehmoment gegen die Last die Drehzahl bestimmt) im motorischen Betrieb zu erläutern, und zwar mit Hilfe von Dampfmaschinen-gestänge: der Schluckvolumenverlauf  $Q_{(V)}$  der Fig. 6 wird durch Abtasten eines Nockenprofils 110 bestimmt, das durch die Bewegung der Kolbenstange 111 auf die Schwinge 112 übertragen wird, wobei sich die Amplitude der Übertragung auf die Schluckvolumenverstellung 104 durch die Höheneinstellung des Kuliseneingriffs der Stange 113 mittels Schraubenhandrad 114 ergibt. Die Kurve  $Q_{(V)}$  kann somit moduliert werden bis hin zur Drehrichtungsumkehr, sobald die Höheneinstellung über den Drehpunkt der Schwinge 112 reicht.

**[0070]** Fig. 7A zeigt schematisch eine Flüssigkolbenanordnung 150 mit einem vereinfachten Weichenventil-konzept. Die Flüssigkolbenanordnung 150 kommt mit nur einem Weichenventil 151 aus, das zwei Messkolben 152a, 152b dieses Gegentaktelements ansteuert und zwar in Abhängigkeit von der Druckdifferenz an der hydrostatischen Einheit 153, die zwischen den Leitungen 154a, 154b auftritt und das Weichenventil 151 beaufschlägt.

**[0071]** Die weiteren Elemente dieses vereinfachten Messkolben-Gegentaktelements sind zwei Flüssigkolben 165a, 165b mit Ventilen und Steuerkolben sowie ein Speicherraum 166. Verbindungsleitungen 167a, 167b führen von den Flüssigkolben 165a, 165b zu dem Speicherraum 166. Ein Flüssigkeitstank 168 ist als Wartungseinheit mit Filter und Wärmetauscher vorgesehen, wobei hier keine Umwälzpumpe erforderlich ist. Ein Rechnerstellglied 169 bewegt die Schluckvolumenverstellung der hydrostatischen Einheit 153 in Abhängigkeit von der Rückmeldung 170 der Kolbenstellung und der Sollwerteingabe 171, wobei die Möglichkeit einer direkten An-koppelung von Vordruckkolben 172a, 172b durch gestrichelte Linien angedeutet ist.

**[0072]** Verschiedene Betriebszustände der Flüssigkolbenanordnung 150 sind in den Fig. 7A bis 7D dargestellt, wobei die Fig. 7A und 7B die Verdichtung des Gases unter Aufwendung von Energie und die Fig. 7C und 7D die Entspannung des Gases zeigen.

**[0073]** Bei der in Fig. 7A dargestellten ersten Stellung des Weichenventils 151 pumpt die hydrostatische Einheit 153 Flüssigkeit in die linke Kammer des Messkolbens 152a. Die rechte Kammer des Messkolbens 152a wird in den Flüssigkeitstank 168 entleert. Ferner wird die Flüssigkeit aus der rechten Kammer des Messkolbens 152b in den Flüssigkolben 165a gepumpt. Der Flüssigkolben 165b wird entleert. Dabei wird die Luft im Flüssigkolben 165a verdichtet, bis der Druck groß genug ist, dass sich das Hochdruckventil des Flüssigkolbens 165a

öffnet.

**[0074]** In Fig. 7B ist die zweite Stellung des Weichenventils 151 dargestellt. Hier pumpt die hydrostatische Einheit 153 Flüssigkeit in die rechte Kammer des Messkolbens 152b, und die linke Kammer des Messkolbens 152b wird in den Flüssigkeitstank 168 entleert. Der Messkolben 152a pumpt Flüssigkeit in den Flüssigkolben 165b, während der Flüssigkolben 165a entleert wird. Dadurch wird der Druck im Speicherraum 166 über den Flüssigkolben 165b erhöht.

**[0075]** Im motorischen Betrieb, d. h. der Entspannung des in dem Speicherraum 166 enthaltenen Gases, wird in der in Fig. 7C dargestellten Stellung des Weichenventils 151 Flüssigkeit aus dem Flüssigkolben 165b durch den Druck des Gases aus dem Speicherraum 166 in die linke Kammer des Messkolbens 152a gepumpt. Die Flüssigkeit aus der rechten Kammer des Messkolbens 152a wird in den Flüssigkolben 165a gepumpt. Da die beiden Messkolben 152a und 152b miteinander gekoppelt sind, treibt der Messkolben 152b über seine rechte Kammer die hydrostatische Einheit 153 und die damit verbundene Welle an.

**[0076]** Bei der in Fig. 7D gezeigten Stellung des Weichenventils 151 sind die Funktionalitäten vertauscht. Der Flüssigkolben 165a überträgt den Hochdruck aus dem Speicherraum 166 auf den Messkolben 152b, wodurch der Messkolben 152a die hydrostatische Einheit 153 antreibt, welche die Energie in eine Bewegung der Welle umsetzt.

**[0077]** In der vorliegenden Beschreibung sind alle Welle/Flüssigkeitswandler mit gutem Grund als reversierbare hydrostatische 4-Quadranten-Einheiten dargestellt, denn damit kann der Hubverlauf verlustarm vorgegeben werden. Dies schließt andere Antriebslösungen nicht aus, allerdings sind die bekannten Lösungen problembehaftet. So scheitert beispielsweise die mechanische Anordnung mit Pleuel und Kolben - obschon mit einigermaßen brauchbarem Kurvenverlauf mit Verlangsamung an den Hubenden - an den Lagerkräften, die bei höherer Leistung und niedrigen Drehzahlen auftreten, abgesehen von den dazu erforderlichen Reduktionsgetrieben.

**[0078]** Des Weiteren wird der Tauscherkolben-Arbeitsraum in den Fig. 1 bis 7 ausschließlich als gekipptes Rechteck-Prisma zur Aufnahme des Blechpaketes dargestellt, mit dem Hochdruckventil an der obersten Spitze. Auch hier sind andere Lösungen denkbar, z. B. als Blechrolle wie nachfolgend beschrieben. Jedoch hat die Trichterwirkung des gekippten Rechteck-Prismas das günstigste Verhalten bezüglich der Stabilität des Flüssigkeitsspiegels bei schnellen Bewegungen, so dass diese Struktur vermutlich sogar für die Sprühtauschung geeignet wäre.

**[0079]** Fig. 8 zeigt schematisch einen Teil einer Flüssigkolbenanordnung 180 mit einer (Wärme-) Tauscherrolle 181 als Alternative zum Rechteck-Prisma. Die Tauscherrolle 181 besteht aus einem zusammengerollten Stück Blech. Die (Wärme-) Tauscherrolle 181 ist im Zylinderkörper 182 eingelassen, dessen schräge Trennfu-

ge 183 mit dem Kolbenblock 184 eine Konvergenz zum Hochdruckventil 185 hin erzeugt, ähnlich wie bei dem prismatischen Blechpaket 53a, 53b der Fig. 3A. Die (Wärme-) Tauscherrolle 181 ist dabei um einen Zylinderkörper 186 des Kolbenblocks 184 gewickelt. Die (Wärme-) Tauscherrolle 181 wird samt Zylinderkörper 186 von einem stiftförmigen Sitzventilkörper 187 seitlich von unten nach oben durchdrungen, so dass über einen Kegel 188 die Verbindung zwischen Vordruckraum 189 und dem Flüssigkolbenraum in der (Wärme-) Tauscherrolle 181 geschaltet werden kann.

**[0080]** Mittels der (Wärme-) Tauscherrolle 181 ist eine totvolumenfreie Schaltung ohne Bewegung des Blechtauschers möglich. Anstelle des Blechtauschers wird hier der Kegel 188 bewegt, um die Verbindung zwischen Vordruckraum 189 und dem Flüssigkolbenraum in der (Wärme-) Tauscherrolle 181 zu öffnen oder zu schließen. Die Bewegung des Kegels 188 erfolgt durch Beaufschlagung eines Steuerkolbens 190 über einen Anschlussnippel 191, wodurch eine Haltefeder 192 zusammengedrückt wird.

**[0081]** Ansonsten sind in Fig. 8 die schon aus Fig. 3A bekannten Elemente vorgesehen, wie Saug-/Auspuffventil, Messkolben, Vordruckkolben, Hydroweiche usw., die einen reibungsfreien Betrieb sichern. Der Rollenteil samt Steuerventilen kann selbstverständlich auch ohne Messkolben betrieben werden, im Sinne der Fig. 1 mit separatem Niederdruckgenerator bzw. Entspanner. Die in Fig. 8 gezeigte Tauscherrolle 181 samt Steuerventilen kann auch in die in den Fig. 1, 3, 5 und 7 gezeigten Flüssigkolbenanordnungen eingefügt werden.

**[0082]** Abschließend ist zu unterstreichen, dass rund um den isothermen Flüssigkolben - sei es mit Platten oder Sprühung - ein komplexes Umfeld mit reibungsfrei zusammenwirkenden Organen erforderlich ist, die in der Funktion innig verzahnt sind.

**[0083]** Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der mittelbare Tauscher aus Blechplatten mit feinen und festen Abständen zwischen den Blechen in Gegentakt-Schaltkreise mit verstellbaren hydrostatischen Einheiten zwecks verlustarmer kinematischer Verbindung mit einer schnell drehenden Welle eingefügt wird. Dabei wird auf den rigorosen zyklischen Austausch der Flüssigkeit geachtet, damit eine optimale Wärmeabfuhr mit ununterbrochener Aufbereitung (Entgasung, Dekantierung, Wasserabscheidung) in einem drucklosen Sumpfbehälter möglich wird. Es sind verschiedene Bauarten von Gegentaktelelementen möglich (mit zwei hydrostatischen Einheiten und fremder Vordruckerzeugung, mit Weichenventilen und Messkolben zwecks Mitnahme eines Vordruckkolbens, mit einem einzigen zentralen Weichenventil für beide Messkolben und Mischungen dieser Varianten), wobei ein Verbund von zwei phasenverschobenen Gegentaktelelementen ein pulsationsarmes Gerät möglich macht, das als schwungradloser Luft/Welle-Transformator mit variabler Drehzahl zusammen mit einem Hochdruck-Luftbehälter einen flexiblen Energiespeicher darstellt, der gegenüber elektrochemischen

Batterien den Vorteil hat, direkt ab Welle Maschinen oder Fahrzeuge antreiben zu können.

## 5 Patentansprüche

1. Flüssigkolbenanordnung (180) zur Verdichtung und Entspannung von Gasen, umfassend

10 - einen Flüssigkolben, der durch einen von einer Flüssigkeit gebildeten Flüssigkeitsspiegel in einem Hochdruckraum verkörpert wird,

### gekennzeichnet durch

15 - eine Blechrolle (181), die in dem Hochdruckraum als Wärmetauscher gelagert ist und von der Flüssigkeit umspült wird,  
 - einen Niederdruckventilkegel (188) zur Verbindung des Hochdruckraums mit einem Niederdruckraum (189), und  
 20 - eine Steuerung (187) des Niederdruckventilkegels (188), die sich **durch** den Hochdruckraum erstreckt.

## Claims

1. A liquid piston arrangement (180) for compressing and expanding gases, comprising

30 - a liquid piston which is embodied by a liquid level formed by a liquid in a high-pressure space;

### characterized by

35 - a coil (181) which is supported in the high-pressure space as a heat exchanger and is sequentially flowed around by the liquid;  
 - a low-pressure valve cone (188) for connecting the high-pressure space to a low-pressure space (189); and  
 40 - a control (187) of the low-pressure valve cone (188) which extends through the high-pressure space.

## Revendications

50 1. Système à piston liquide (180) destiné à la compression et à la détente de gaz, comprenant

55 - un piston liquide qui est représenté par un niveau de liquide, formé par un liquide, dans un espace à haute pression,

### caractérisé par

- un rouleau en tôle (181) qui est monté en tant qu'échangeur de chaleur dans l'espace à haute pression et qui est entouré par le liquide,
- un cône formant vanne à basse pression (188) pour relier l'espace à haute pression à un espace à basse pression (189), et
- une commande (187) du cône formant vanne à basse pression (188), qui traverse l'espace à haute pression.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

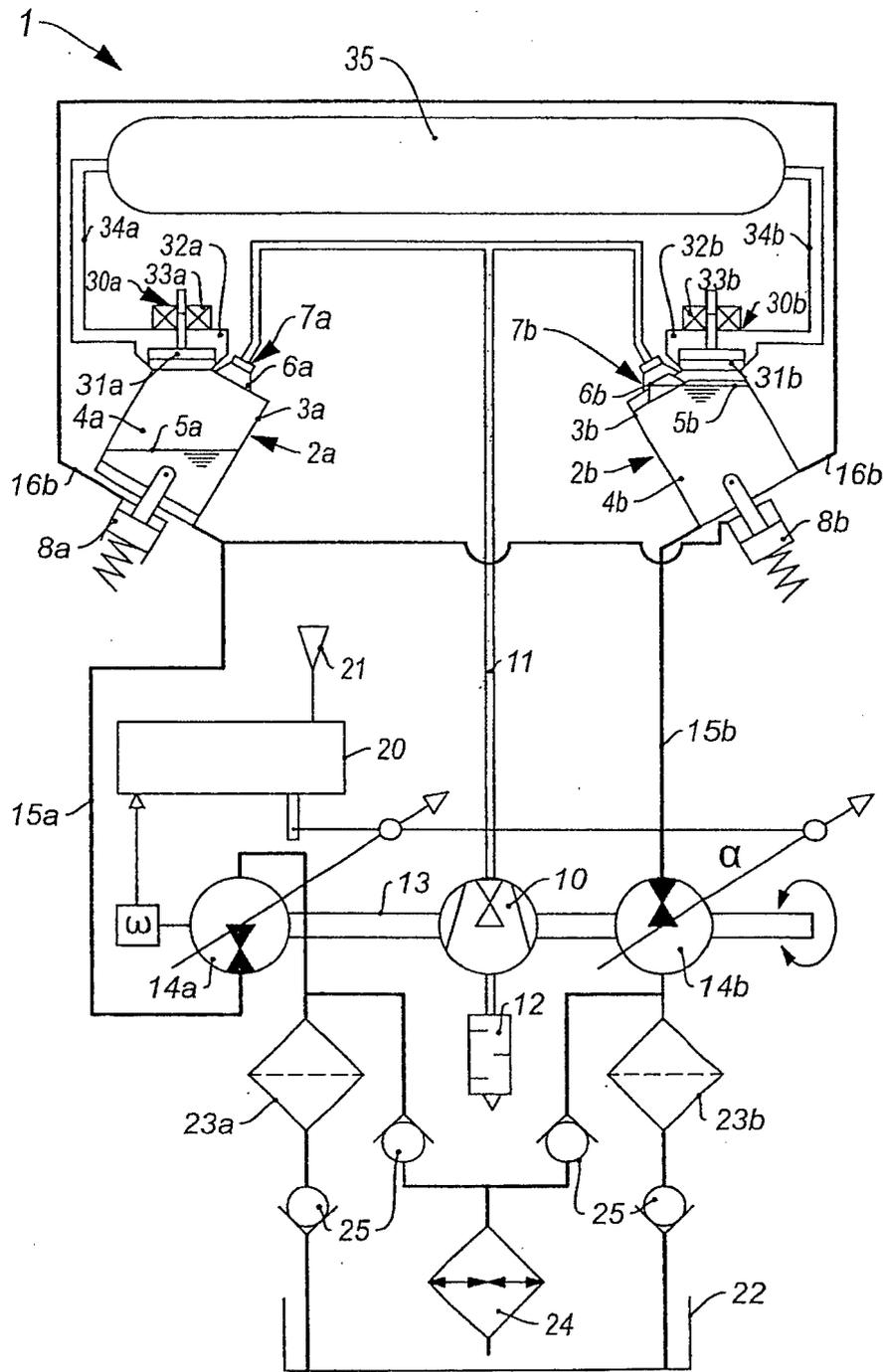


Fig. 1

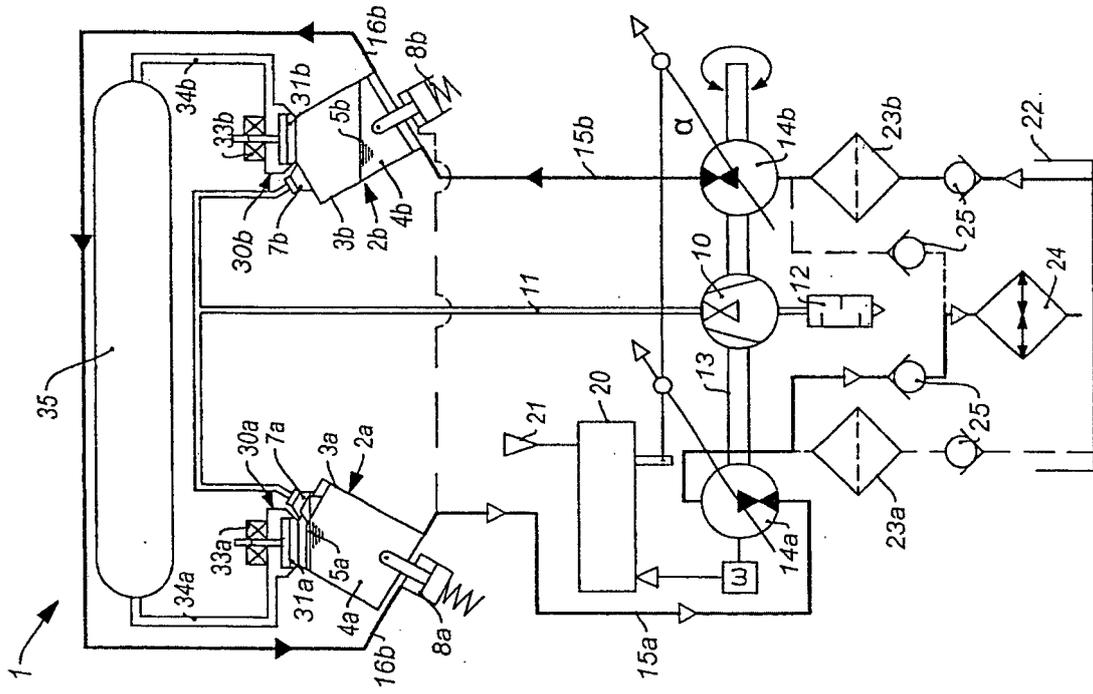


Fig. 2B

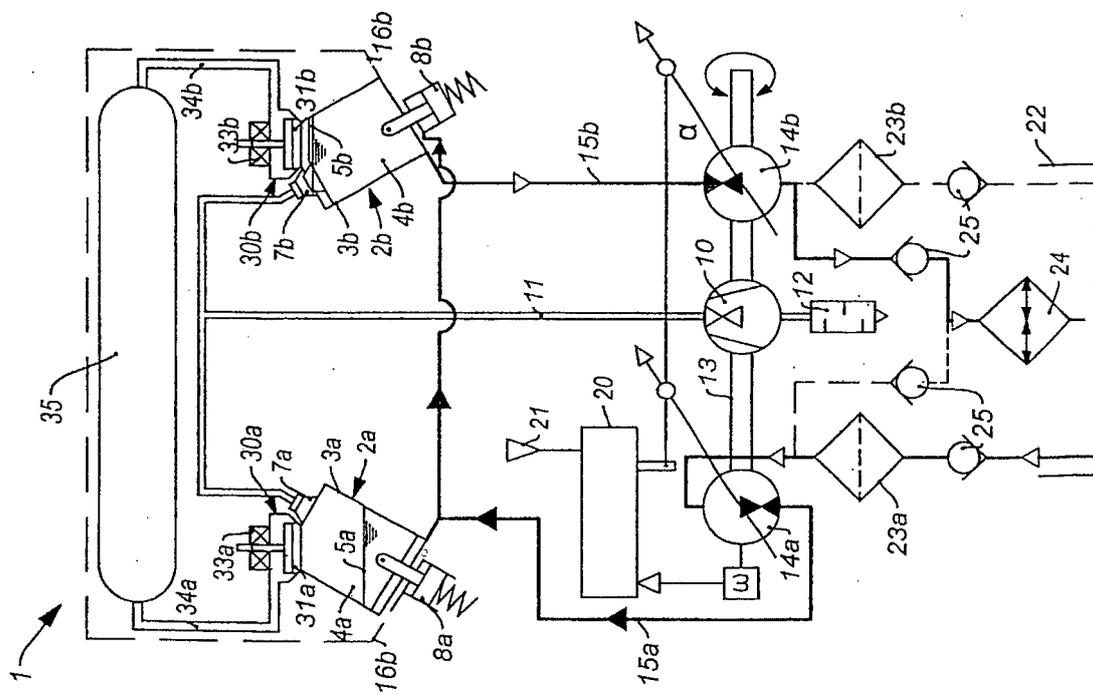


Fig. 2A

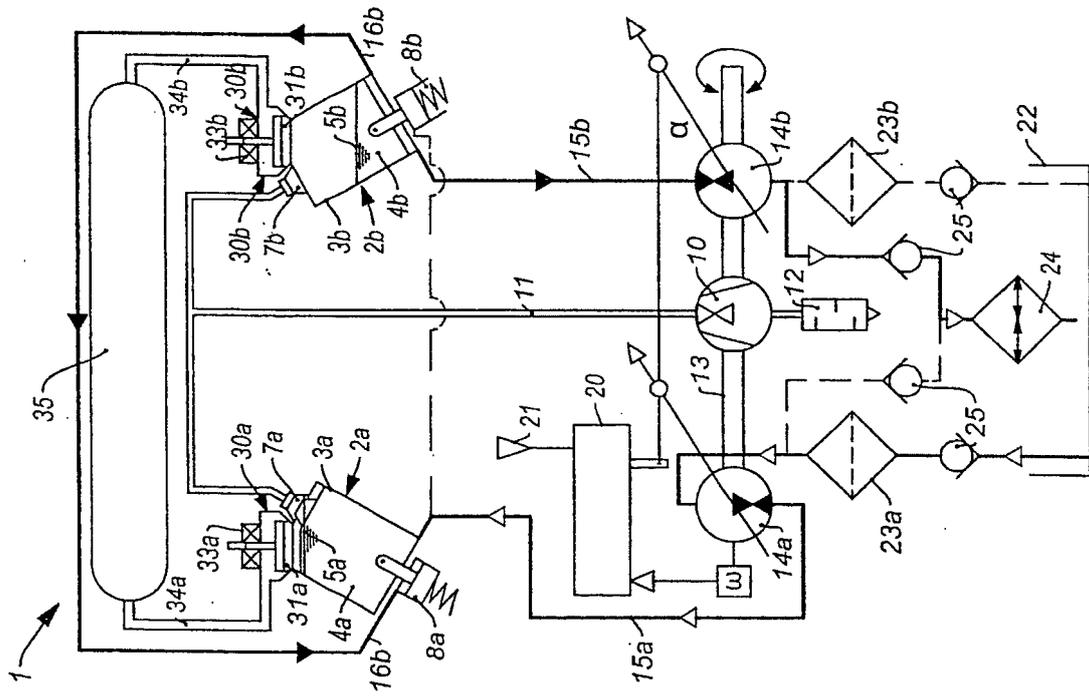


Fig. 2D

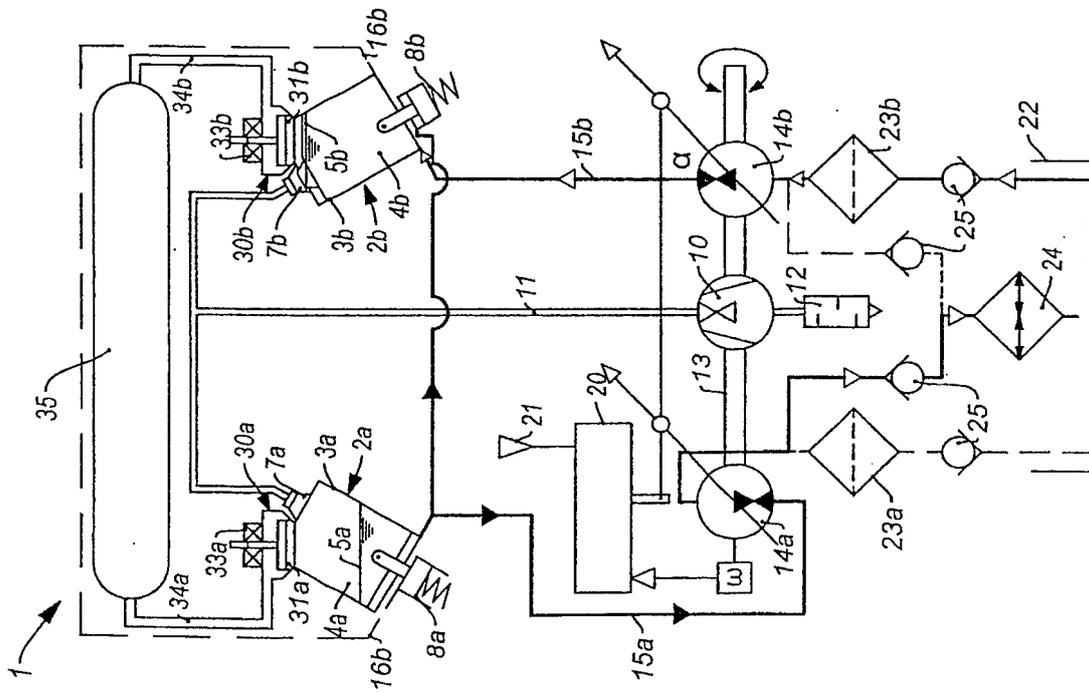


Fig. 2C

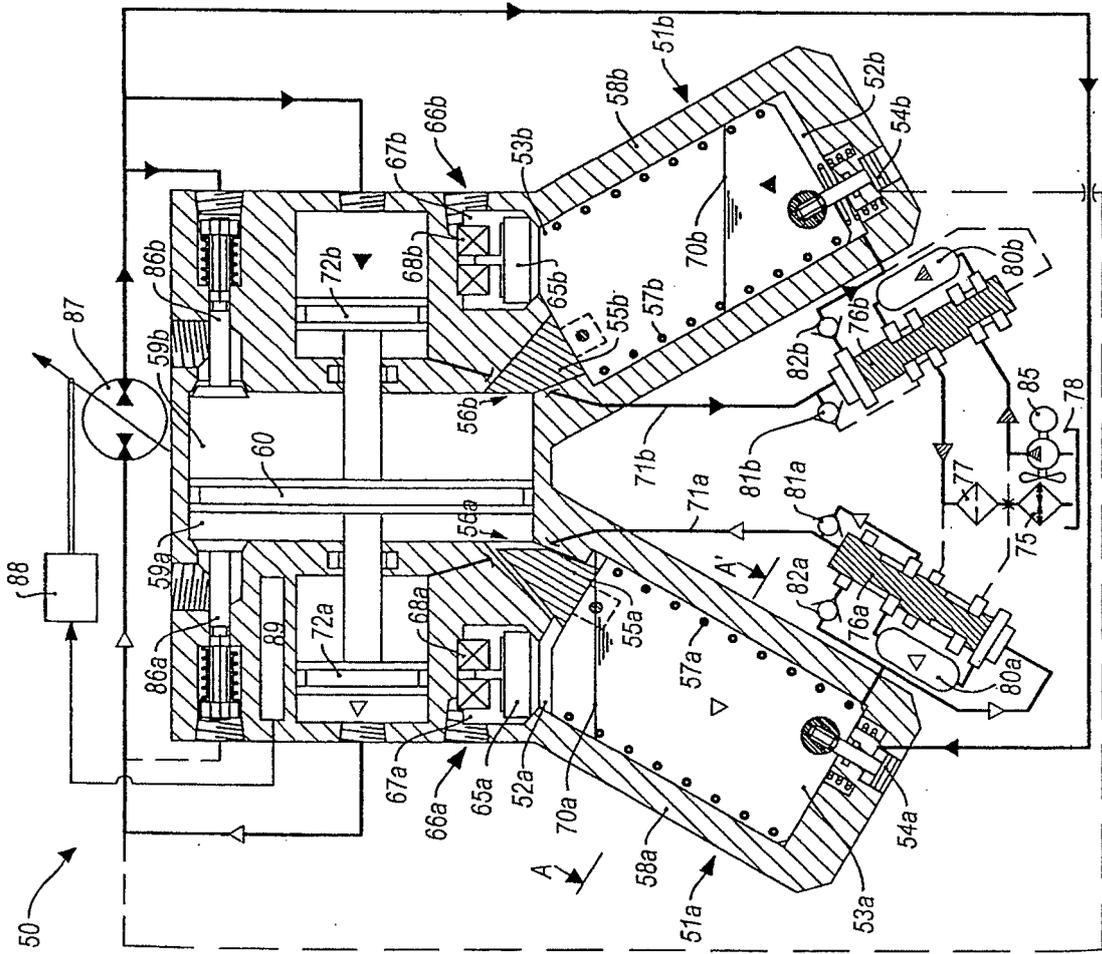


Fig. 3A

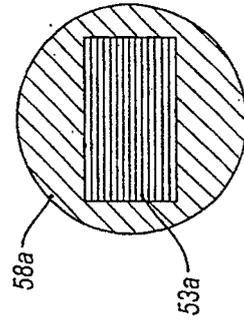


Fig. 4

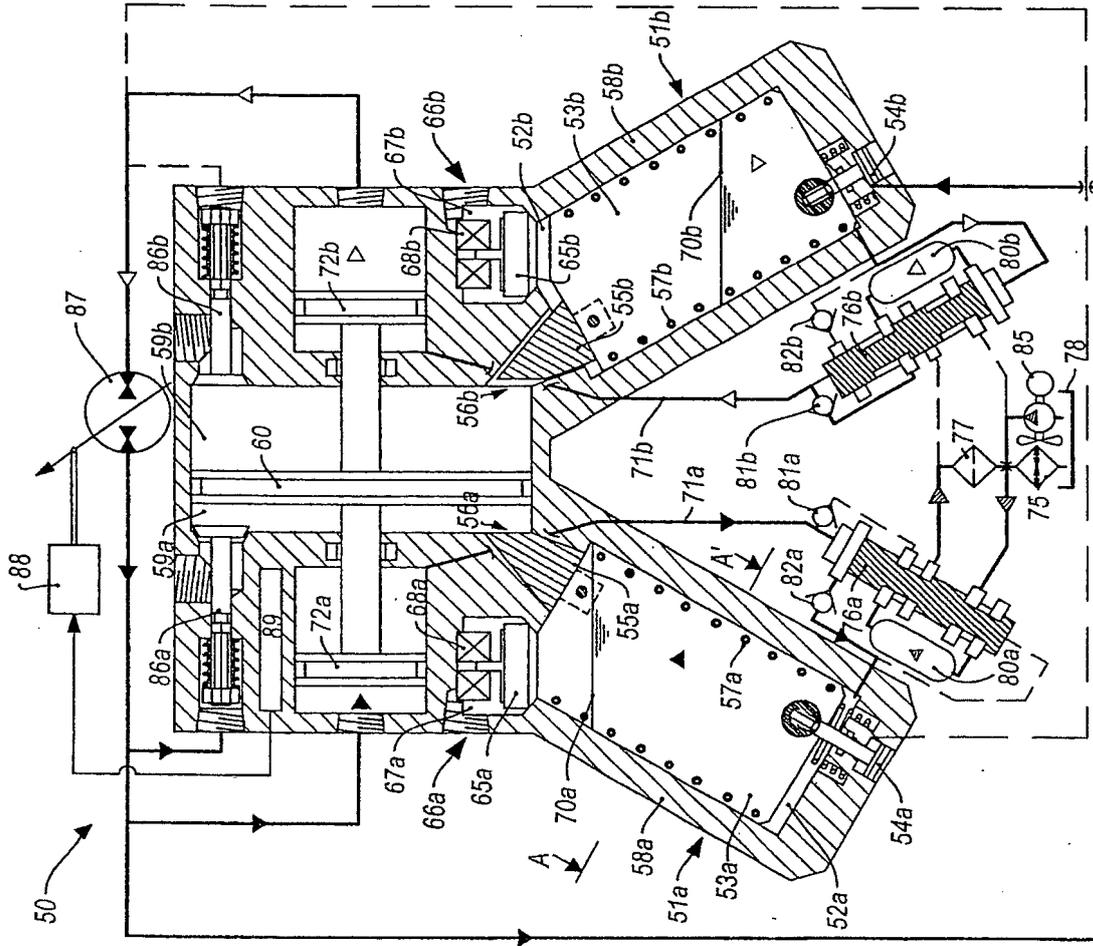


Fig. 3B

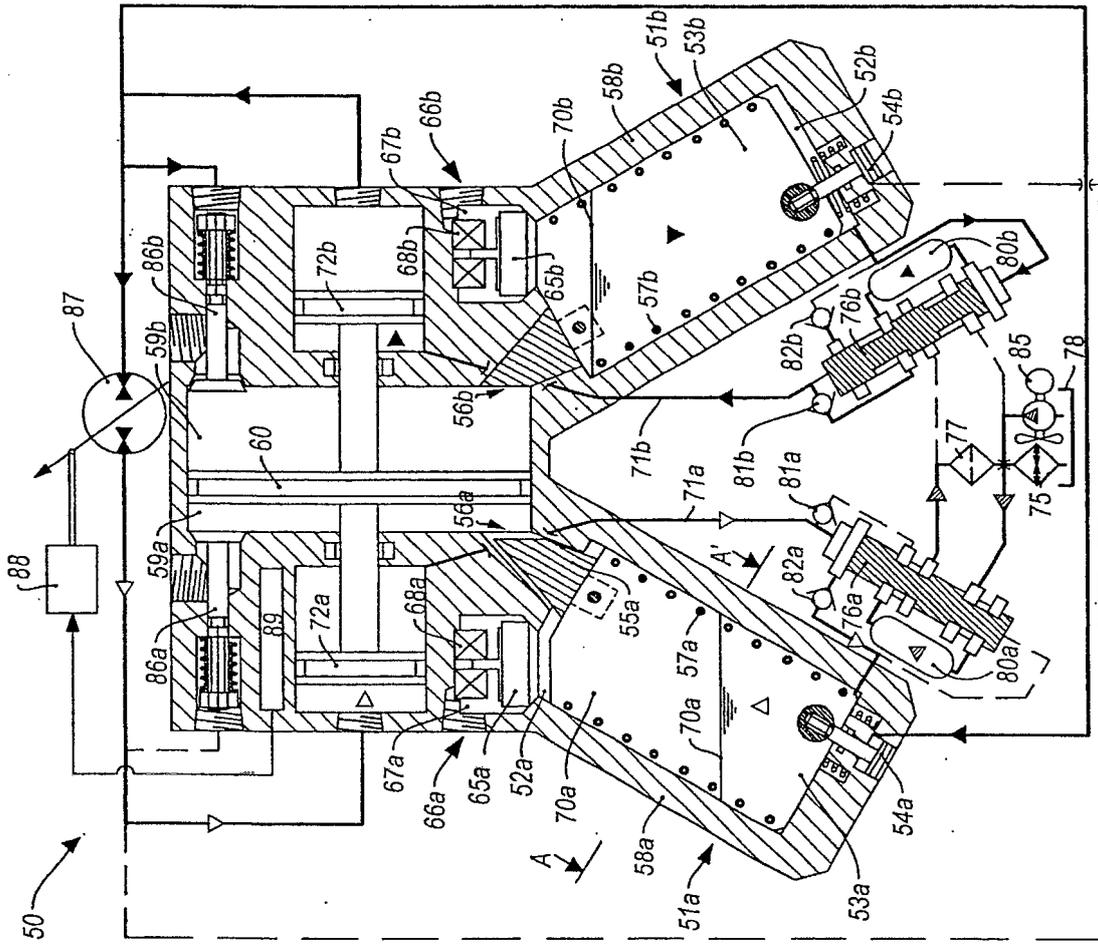


Fig. 3C

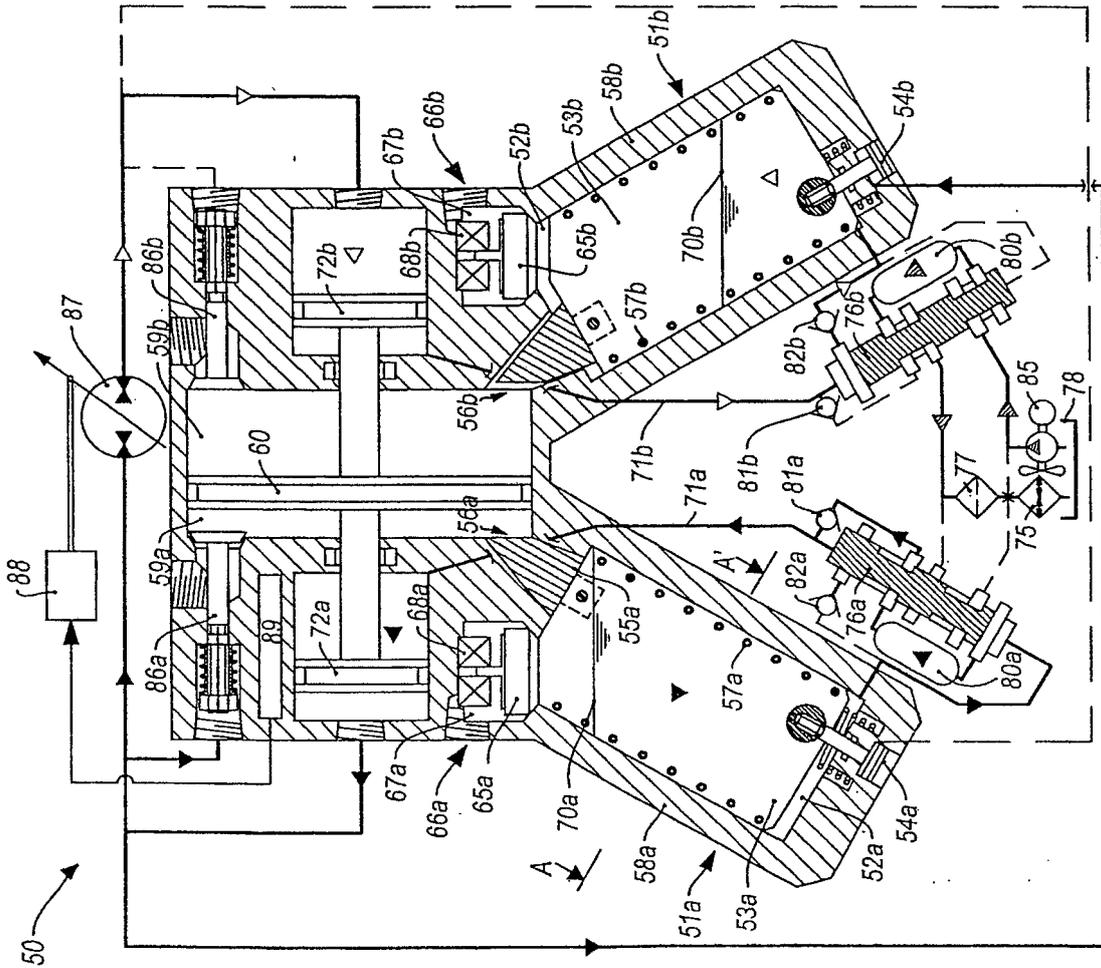


Fig. 3D

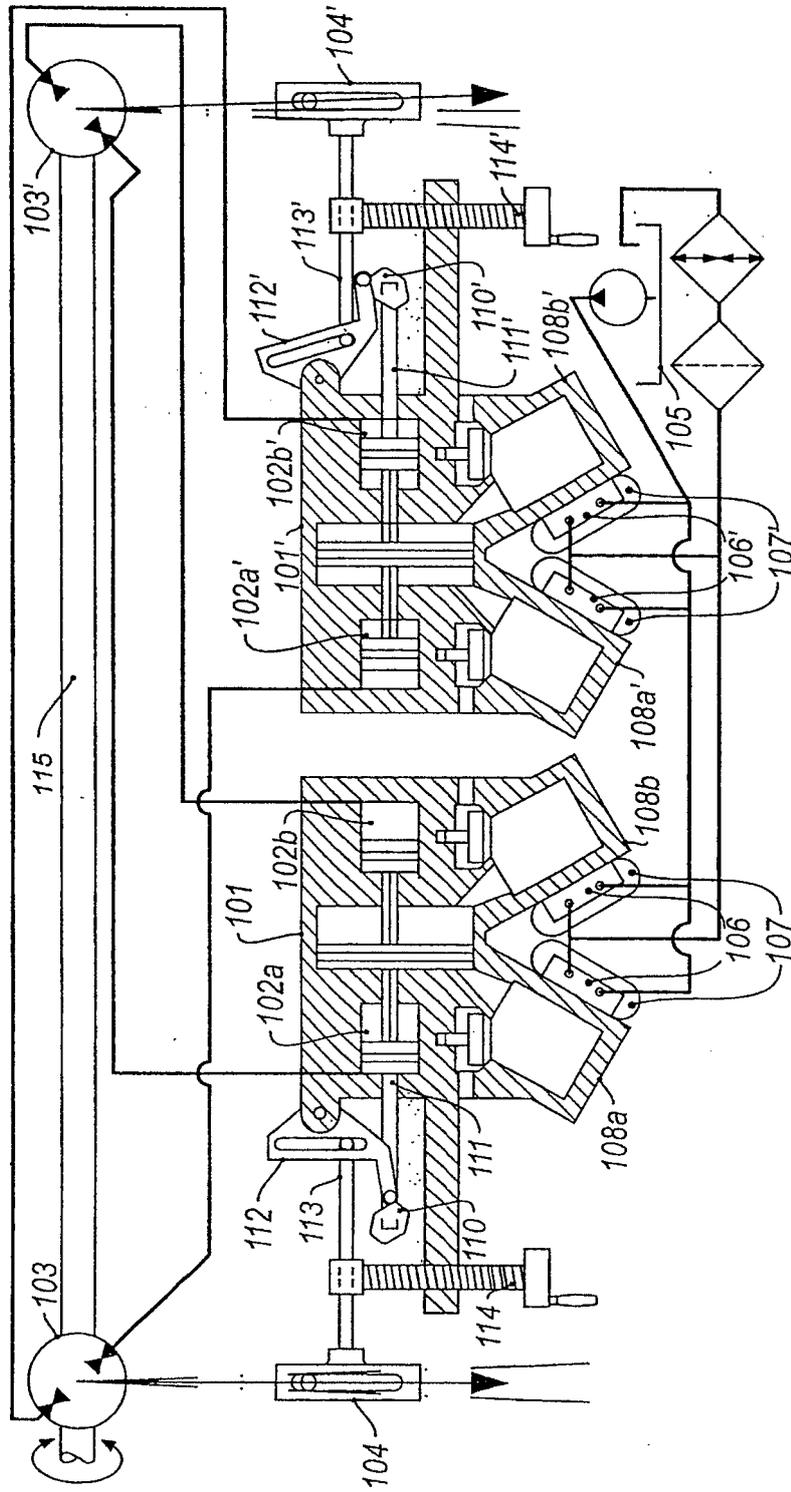


Fig. 5



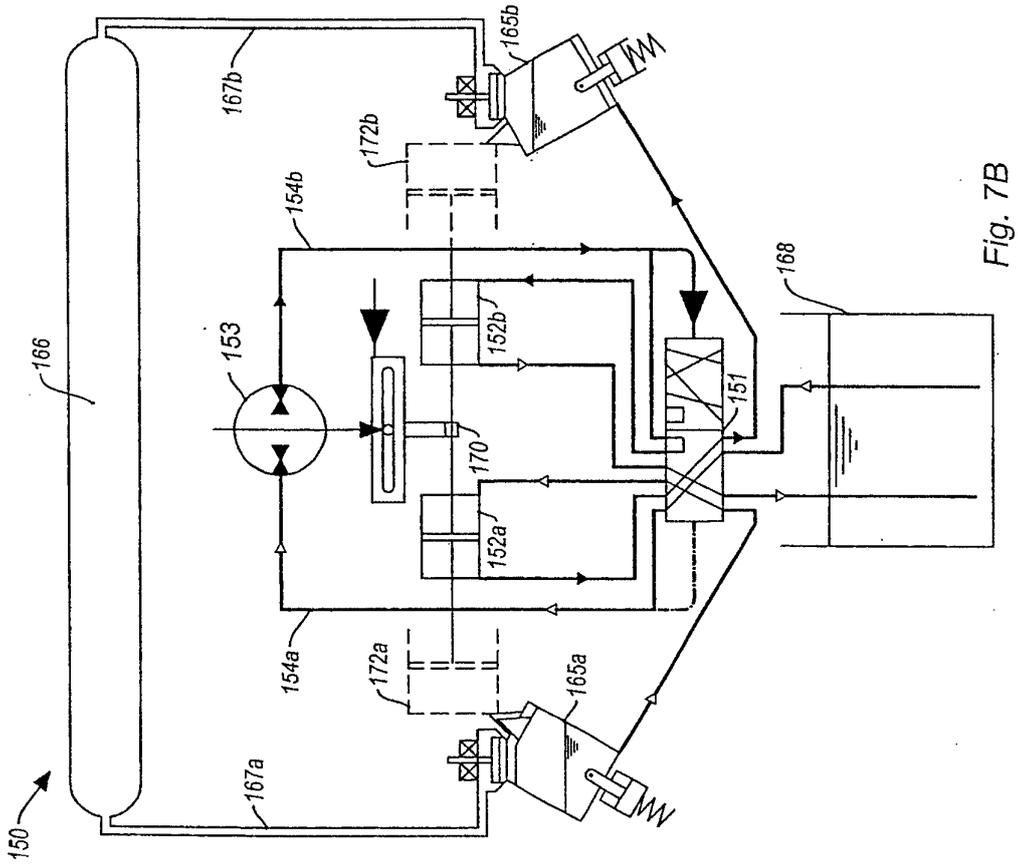


Fig. 7B

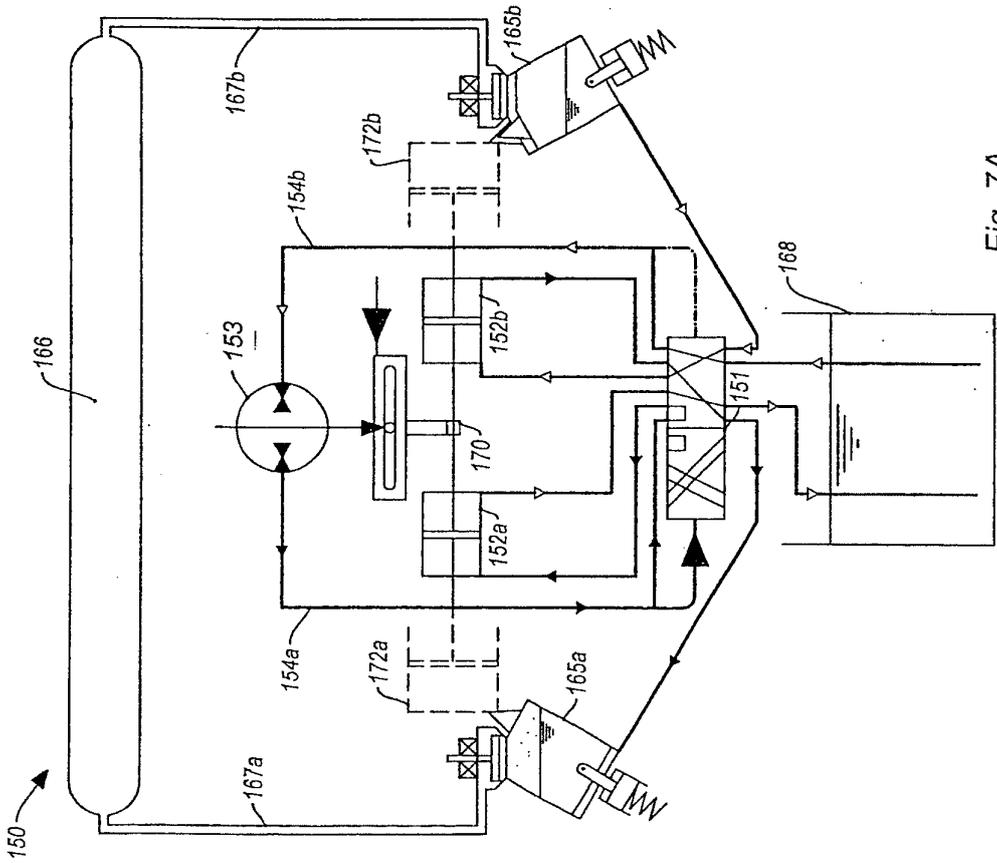


Fig. 7A

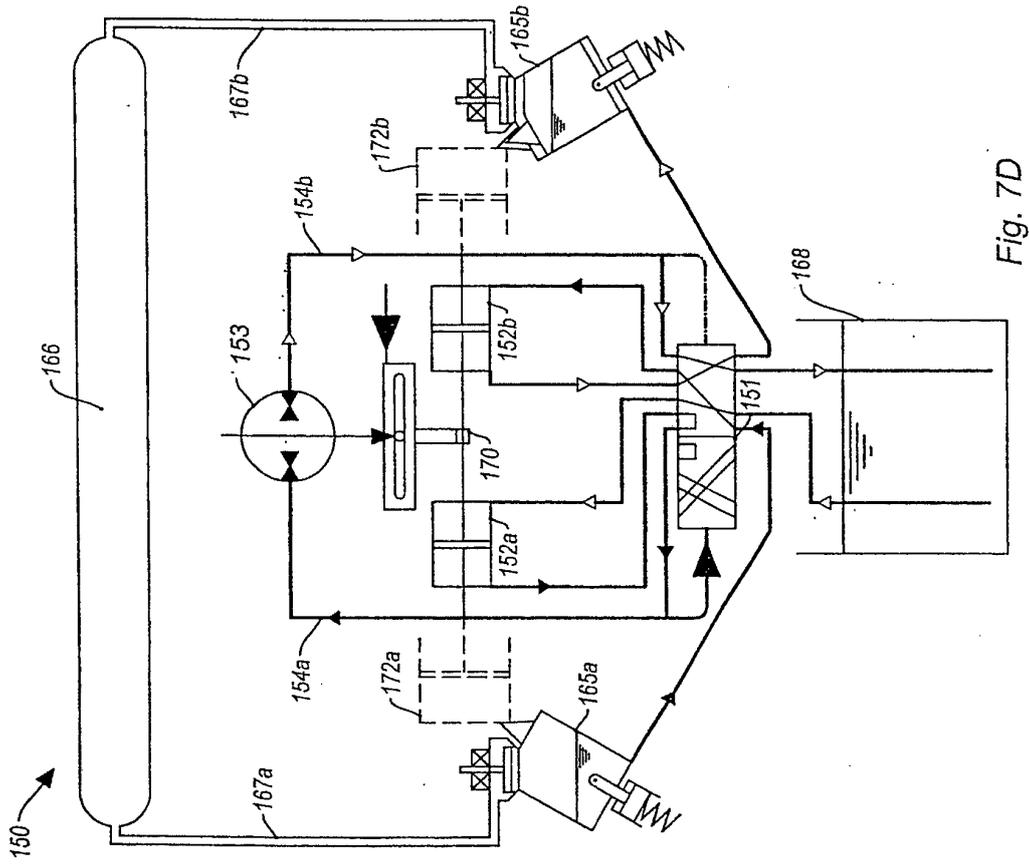


Fig. 7D

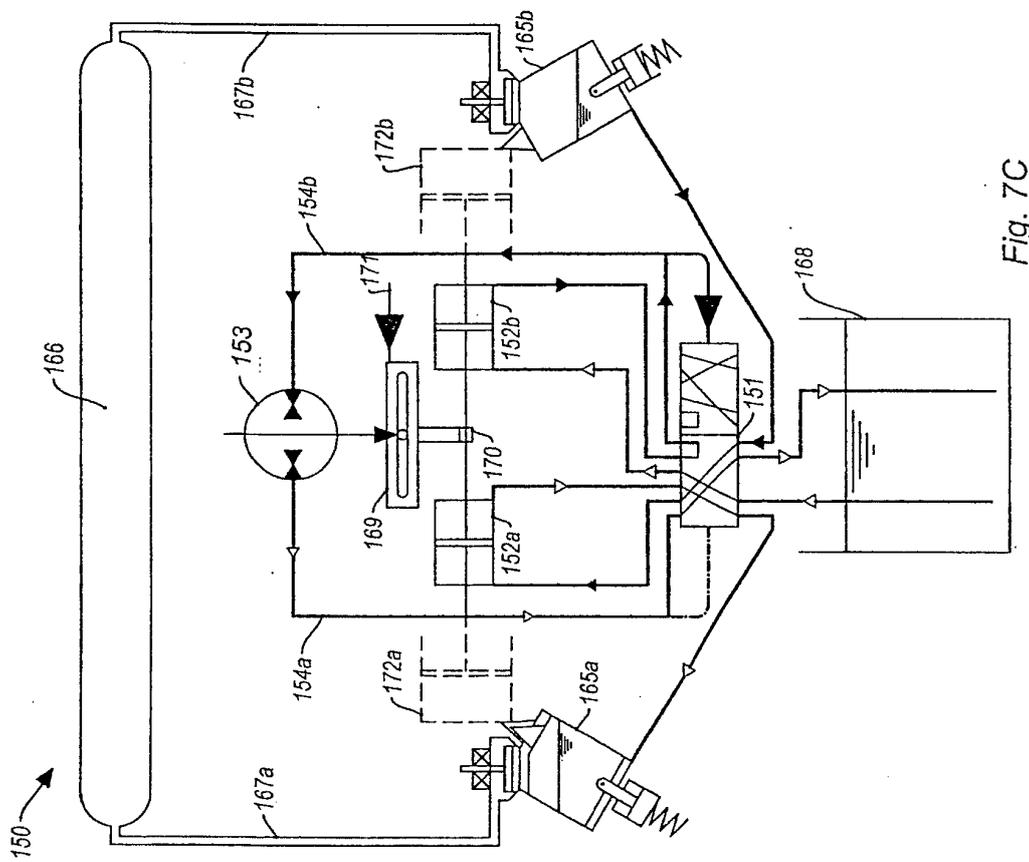


Fig. 7C

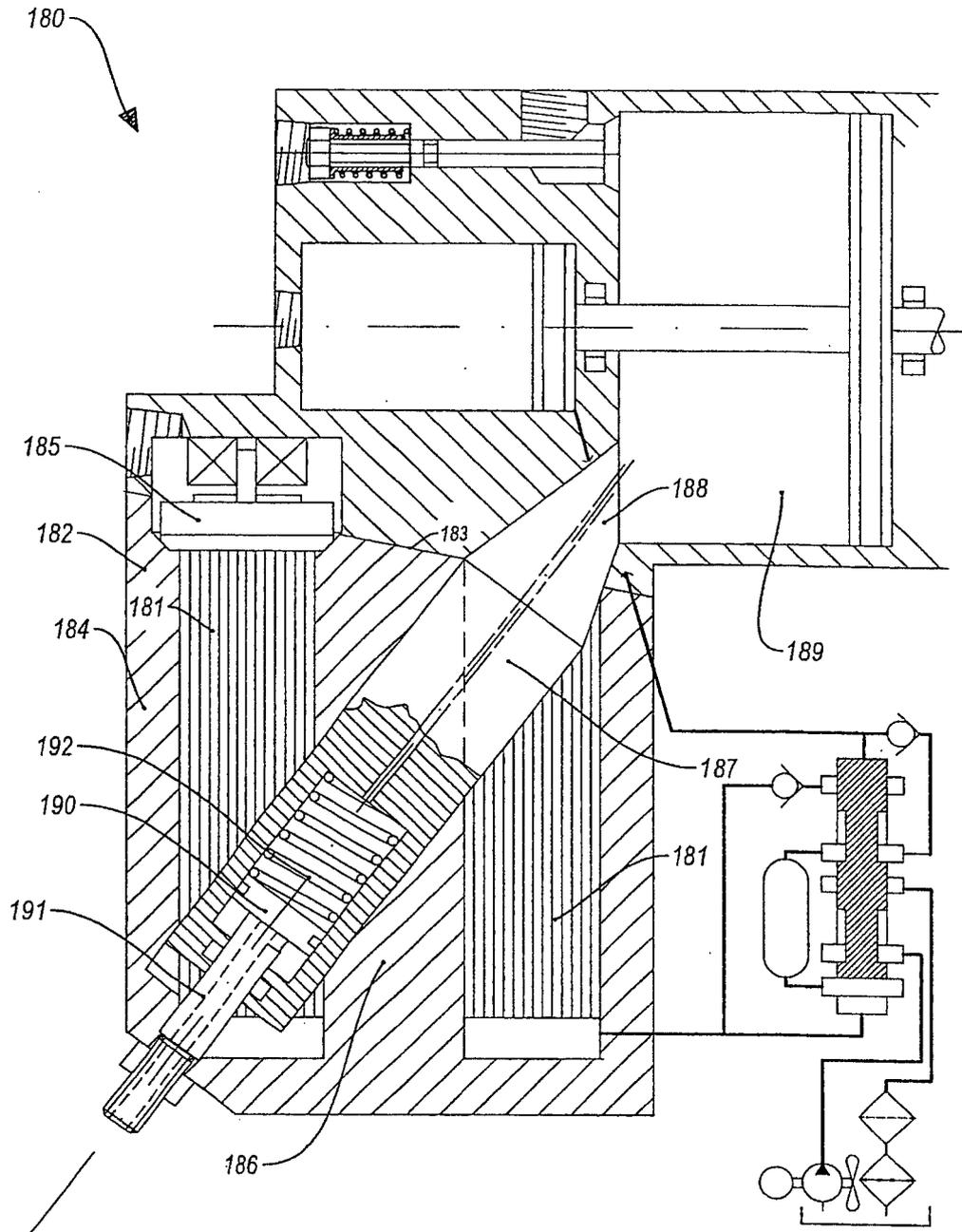


Fig. 8

**IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE**

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

**In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente**

- DE 3408633 A1 [0003]
- US 586100 A [0003]
- EP 2273119 B1 [0003] [0007]
- DE 102008042828 A1 [0007]
- WO 2010128224 A1 [0007]
- DE 4430716 A1 [0007]