

(19)



(11)

EP 1 783 377 A2

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
09.05.2007 Patentblatt 2007/19

(51) Int Cl.:
F04D 29/58^(2006.01) F04D 29/54^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **06022389.8**

(22) Anmeldetag: **26.10.2006**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC NL PL PT RO SE SI SK TR

Benannte Erstreckungsstaaten:
AL BA HR MK YU

(30) Priorität: **02.11.2005 DE 102005052591**

(71) Anmelder: **Behr GmbH & Co. KG**
70469 Stuttgart (DE)

(72) Erfinder:
• **Flik, Markus, Dr.**
70839 Gerlingen (DE)
• **Thumm, Andreas, Dr.**
74360 Ilsfeld (DE)
• **Eitel, Jochen, Dipl.-Ing.**
73266 Bissingen (DE)
• **Heckenberger, Thomas, Dr.-Ing.**
70771 Leinfelden-Echterdingen (DE)
• **Lutz, Rainer, Dipl.-Ing.**
71711 Steinheim (DE)

(54) **Vorrichtung zur Ladeluftverdichtung für einen Verbrennungsmotor**

(57) Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Ladeluftverdichtung für einen Verbrennungsmotor insbesondere eines Kraftfahrzeugs, umfassend eine Mehrzahl von wenigstens drei einander nachgeordneten Verdichterelementen (3a, 3b, 3c, 3d), und eine Welle (1) zum gemeinsamen Antrieb der Verdichterelemente (3a, 3b, 3c, 3d). Eine Vorrichtung, die eine verbesserte Nutzung der Antriebsleistung eines Verdichters bei gleichzeitig

guter Kühlung der resultierenden Ladeluft bereitstellt, wird erfindungsgemäß dadurch geschaffen, dass die Vorrichtung zumindest zwei mit einem flüssigen Kühlmittel durchströmbare Wärmetauscher (4a, 4b, 4c, 4d, 6a, 6b, 6c, 6d) umfasst, wobei jeder der Wärmetauscher (4a, 4b, 4c, 4d, 6a, 6b, 6c, 6d) zwischen zwei aufeinander folgenden Verdichterelementen (3a, 3b, 3c, 3d) angeordnet und von der Ladeluft durchströmbar ist.

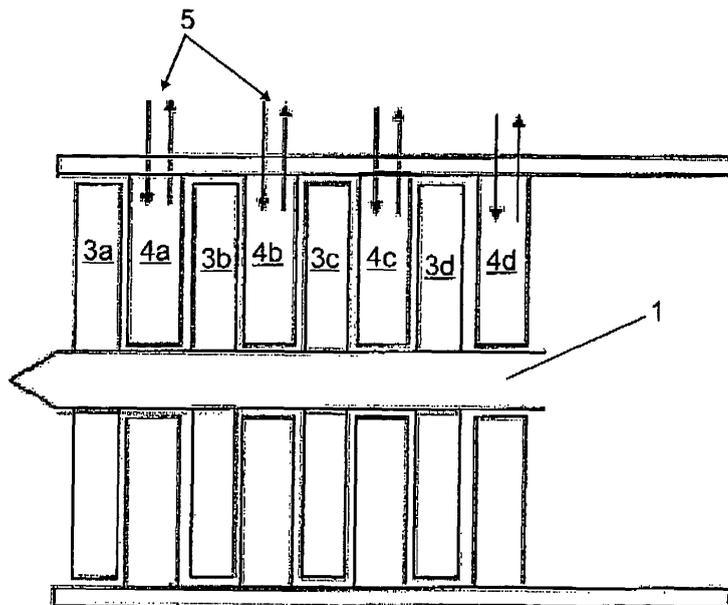


Fig. 4

EP 1 783 377 A2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Ladeluftverdichtung für einen Verbrennungsmotor, insbesondere einen Verbrennungsmotor eines Kraftfahrzeugs, nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

[0002] Es ist allgemein bekannt, zur Erhöhung des Wirkungsgrades von Verbrennungsmotoren die zugeführte Ladeluft mittels Turboladern oder Kompressoren zu verdichten. Im Sinne des thermodynamischen Gesamtwirkungsgrades sind dabei Turbolader grundsätzlich vorteilhaft, da sie ihre Antriebsenergie aus dem sonst nicht genutzten Abgasstrom und nicht aus der mechanischen Nutzleistung des Motors beziehen.

[0003] In der US 6,948,909 B2 ist eine rotierende Kompressorereinheit mit einer inneren Zwischenkühlung offenbart.

[0004] Unabhängig von der Problematik des Antriebs eines solchen Verdichters ist es gewünscht, die Verdichtung selbst mit einem Minimum an thermischen Verlusten und somit unter optimaler Ausnutzung der Antriebsleistung des Verdichters zu gewährleisten. Zudem ist es notwendig, die bei der Verdichtung zwangsläufig erhitzte Luft vor einer Zuführung in die Brennräume des Verbrennungsmotors ausreichend zu kühlen, um eine kontrollierte Gemischzündung zu gewährleisten sowie einen guten Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors zu erlangen. Hierzu sind allgemein Ladeluftkühler bekannt, die in einem Luftkanal zwischen Verdichter und Verbrennungsmotor angeordnet sind.

[0005] Es ist die Aufgabe der Erfindung, eine Vorrichtung zur Ladeluftverdichtung für einen Verbrennungsmotor anzugeben, die eine verbesserte Nutzung der Antriebsleistung eines Verdichters bei gleichzeitig guter Kühlung der resultierenden Ladeluft bereitstellt.

[0006] Diese Aufgabe wird für eine eingangs genannte Vorrichtung erfindungsgemäß mit den kennzeichnenden Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst.

[0007] Durch die erfindungsgemäße Anordnung von wenigstens zwei Wärmetauschern zwischen jeweils aufeinander folgenden Verdichterelementen ist eine stufige Verdichtung mit jeweils nachfolgender Abkühlung erzielt. Hierdurch wird ein wesentlicher Schritt in Richtung einer verlustarmen Verdichtung erreicht, deren thermodynamisches Optimum bei einer isothermen Verdichtung liegt.

[0008] In bevorzugter Ausführung beträgt die Anzahl der Verdichterelemente und der Wärmetauscher jeweils wenigstens drei, besonders bevorzugt jeweils wenigstens vier. Durch diese höhere Anzahl von alternierend aufeinander folgenden Verdichterelementen und Wärmetauschern ist eine drei-, vier- oder allgemein k-stufige Verdichtung mit Zwischenkühlung erzielt. Das theoretische Optimum der isothermen Verdichtung wird durch eine erfindungsgemäße Vorrichtung bei einer unendlichstufigen Verdichtung mit jeweiliger Zwischenkühlung erreicht, wobei bei dem Grenzwert $k \rightarrow \infty$ die Verdichtung einer einzelnen Stufe gegen den Grenzwert null geht. Im

Zuge einer sinnvollen technischen Realisierung gilt es hierbei ein Optimum der Anzahl der Stufen zu finden, da bei einer zu hohen Anzahl von Stufen negative Effekte wie Reibung und Druckverluste, baulicher Aufwand etc. dominant werden.

[0009] Bei einer besonders geeigneten Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung sind die Verdichterelemente als um die gemeinsame Welle drehbare Axialverdichter ausgebildet. Bei Axialverdichtern treten meist weniger Umlenkungen und Verwirbelungen der Ladeluft auf als bei Radialverdichtern, so dass hier die Integration mehrerer Verdichterstufen mit nachfolgenden Wärmetauschern auf einfache Weise erzielbar ist. Alternativ können die Verdichterelemente jedoch auch Radialverdichter sein; auch eine Kombination von axialen Verdichterelementen und radialen Verdichterelementen in einer baulichen Einheit ist denkbar.

[0010] Im Falle von Axialverdichtern ist bevorzugt zwischen zwei Verdichterelementen ein drehbares Leitelement zur Führung der Ladeluft angeordnet. Besonders vorteilhaft ist dabei das Leitelement als eine bauliche Einheit mit zumindest einem der Wärmetauscher ausgebildet. Hierbei kann das Leitelement vorteilhaft einen flachen und von der Ladeluft umströmbaren Leitkörper umfassen, der einen Kanal zur Führung des Kühlmittels aufweist. Alternativ kann der jeweilige Wärmetauscher auch in Strömungsrichtung vor oder nach dem Leitelement angeordnet sein und somit ein separates Bauteil darstellen. Es kann sich auch um eine kombinierte Vorrichtung handeln, bei der einige der Leitelemente integriert als Wärmetauscher ausgebildet sind und andere der Leitelemente mit einem von ihnen separierten Wärmetauscher kombiniert sind.

[0011] Bei einer bevorzugten Ausführungsform umfasst der Wärmetauscher eine Mehrzahl von im wesentlichen konzentrischen, ringförmigen Tauscherelementen, die jeweils von dem Kühlmittel durchströmbar sind. Hierdurch ist ein geeigneter Wärmetauscher auf einfache Weise ausgebildet. Der Wärmetauscher kann alternativ oder ergänzend auch ein im wesentlichen spiralförmiges Tauscherelement umfassen, das von dem Kühlmittel durchströmbar ist. Durch die spiralförmige Ausbildung kann vorteilhaft dem Umstand Rechnung getragen werden, dass die aus dem vorgeordneten Verdichterelement austretende Ladeluft im allgemeinen mit einem Drall beaufschlagt ist.

[0012] Allgemein bevorzugt ist das Kühlmittel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung mittels eines Kühlers im wesentlichen auf eine Umgebungslufttemperatur kühlbar. Durch einen solchen Niedertemperatur-Kühlkreis für das flüssige Kühlmittel ist eine gute Kühlung der Ladeluft in den einzelnen Wärmetauschern erzielbar. Alternativ oder ergänzend kann das Kühlmittel auch mit einem Verdampfer einer Kälteanlage eines Kraftfahrzeugs thermisch verbindbar sein. Diese Verbindung kann insbesondere regelbar sein; häufig wird die Kälteleistung einer Klimaanlage eines Kraftfahrzeugs nicht vollständig genutzt. Bei besserer Nutzung der Kühlleistung zur zusätz-

lichen Kühlung der Ladeluft kann der Gesamtwirkungsgrad des Verbrennungsmotors sinnvoll verbessert werden.

[0013] In besonders bevorzugter Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung ist kein herkömmlicher Ladeluftkühler in einem Ladeluftkanal zwischen den Verdichterelementen und dem Verbrennungsmotor angeordnet. Hierbei wird durch die erfindungsgemäße Integration der Ladeluftkühlung mit dem Verdichterelement eine kostensparende Vermeidung des aufwendigen separaten Ladeluftkühlers, wie er aus dem Stand der Technik bekannt ist, vermieden.

[0014] Weitere Vorteile und Merkmale einer erfindungsgemäßen Vorrichtung ergeben sich aus dem nachfolgend beschriebenen Ausführungsbeispiel sowie aus den abhängigen Ansprüchen.

[0015] Nachfolgend wird ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung beschrieben und anhand der anliegenden Zeichnungen näher erläutert.

Fig. 1 zeigt ein Zustandsdiagramm für verdichtete Ladeluft zur Veranschaulichung der Ersparnis mechanischer Arbeit bei der Einführung einer einstufigen Zwischenkühlung.

Fig. 2 zeigt ein Diagramm zur Veranschaulichung der theoretisch möglichen Verbesserung bei einer k-stufigen Zwischenkühlung bei idealer Wärmetauschung.

Fig. 3 zeigt ein Fig. 2 entsprechendes Diagramm, wobei ein nicht vollständiger Wirkungsgrad der Wärmetauscher angenommen wurde.

Fig. 4 zeigt eine schematische Darstellung eines Axialverdichters mit vier Verdichterelementen und vier als Wärmetauscher ausgebildeten Leitelementen.

Fig. 5 zeigt eine Abwandlung des Axialverdichters aus Fig. 4, wobei Leitelemente und Wärmetauscher separat voneinander ausgebildet sind.

Fig. 6 zeigt eine schematische Darstellung eines Wärmetauschers einer erfindungsgemäßen Vorrichtung.

[0016] In dem Diagramm aus Fig. 1 sind Zustandskurven von verdichteter Ladeluft dargestellt. Im Falle eines herkömmlichen einstufigen Verdichters ohne Zwischenkühlung verläuft die Verdichtung entlang der gebogenen Linie A von Punkt 1 zur Punkt 5. Die für diese Verdichtung erforderliche mechanische Arbeit entspricht der Fläche unter der Kurve zwischen den Punkten 4-1-5-3'.

[0017] Bei einer zweistufigen Verdichtung mit einer isobaren Abkühlphase B zwischen zwei Verdichterstufen verläuft die Zustandskurve der Ladeluft entlang 1-2-1'-2'. Gegenüber der einstufigen Verdichtung wird somit die Arbeit C eingespart, die der Fläche unter den Punkten 1'-2-5-2' entspricht. Zur Veranschaulichung sind zudem für zwei Temperaturen T1, T2 die Hyperbeln eingezeichnet, die einer isothermen Verdichtung entsprechen wür-

den. Für eine isotherme Verdichtung gilt allgemein $p \cdot V = \text{konstant}$.

[0018] Fig. 2 zeigt die Ergebnisse einer Simulation für eine allgemein k-stufige Verdichtung, wobei nach jeder Verdichterstufe eine optimale Abkühlung der Ladeluft auf die ursprüngliche Eingangstemperatur in die Verdichterkaskade erfolgt. Die linke Ordinate des Diagramms gibt die auf die Ladeluftmasse normierte erforderliche technische Arbeit wieder. Dabei bedeuten Wt: technische Arbeit; m: Masse des Gases; R: Gaskonstante des idealen Gases. Die rechte Ordinate gibt die prozentuale Einsparung der erforderlichen technischen Arbeit des Verdichters gegenüber einer einstufigen Aufladung an. Für $k \rightarrow \infty$ (k gegen Unendlich), also den Grenzwert einer isothermen Verdichtung, entspricht das theoretische Optimum der Einsparung technischer Arbeit etwa 27 %. Erkennbar wird bereits bei relativ geringer Anzahl von Verdichtungsstufen, beispielsweise vier, eine Einsparung von deutlich über 20 % erreicht.

[0019] Bei der Simulation gemäß Fig. 3 wurde angenommen, dass der Wirkungsgrad der Zwischenkühler nicht optimal ist. Der hierfür relevante Quotient aus erzielter Abkühlung und maximal möglicher Abkühlung in einer Wärmetauscherstufe wurde zudem nicht nur als < 1 , sondern auch als nicht konstant über die Nummer der Verdichterstufe angenommen, um eine möglichst vernünftige Annäherung an technisch realisierbare Lösungen zu erzielen. Dabei zeigt sich, dass bereits bei wenigen Stufen einer Zwischenkühlung auch unter der Annahme von technisch realisierbaren Wirkungsgraden von Wärmetauschern eine Einsparung der Verdichterarbeit von mehr als 10 % erreicht wird.

[0020] Fig. 4 zeigt ein besonders bevorzugtes Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Verdichters. Der Verdichter ist als Axialverdichter ausgeführt, bei dem sich eine angetriebene Welle 1 zentrisch in einem Verdichtergehäuse 2 dreht. Die Welle 1 ist einstückig der Abtriebswelle einer Abgasturbine zum Antrieb des Verdichters verbunden (nicht dargestellt). Mit der Welle 1 sind vier als Schaufelsätze ausgeformte Verdichterelemente 3a, 3b, 3c, 3d fest verbunden. Die mechanische Verdichterarbeit wird hauptsächlich durch diese vier Verdichterelemente 3a, 3b, 3c, 3d geleistet. Nach jedem der Verdichterelemente ist jeweils ein Leitelement 4a, 4b, 4c, 4d angeordnet. Diese Leitelemente sind im wesentlichen auf an sich bekannte Weise hinsichtlich der Strömungsführung der verdichteten Luft geformt. Zudem ist jedes der Leitelemente 4a, 4b, 4c, 4d mit inneren Kühlmittelkanälen versehen, durch die ein Kühlmittel über Anschlüsse 5 ein- und ausströmen kann. Somit bildet jedes der Leitelemente 4a, 4b, 4c, 4d zugleich einen Wärmetauscher zur Zwischenkühlung der teilverdichteten Ladeluft aus. Auf diese Weise wird bei der Verdichtung der Ladeluft über mehrere Verdichterstufen und mehrere Stufen einer Zwischenkühlung eine Annäherung an die theoretisch optimale isotherme Verdichtung (siehe Fig. 1 bis Fig. 3) erzielt.

[0021] Fig. 5 zeigt eine Abwandlung der Vorrichtung

aus Fig. 4. Im Unterschied zu der Vorrichtung aus Fig. 4 ist dabei der jeweilige Wärmetauscher der Zwischenkühlung nicht baueinheitlich mit einem dem Verdichterelement 3a, 3b, 3c, 3d nachgeordneten Leitelement 4a', 4b', 4c', 4d' ausgebildet. Vielmehr liegen separate Wärmetauscher 6a, 6b, 6c, 6d vor, die jeweils unmittelbar nach einem der Leitelemente 4a', 4b', 4c', 4d' angeordnet sind.

[0022] Fig. 6 zeigt ein Wärmetauscherelement, das in einen der zuvor beschriebenen Axialverdichter eingesetzt sein kann. Der Wärmetauscher nach Fig. 6 kann sowohl gemäß Fig. 5 als separater Wärmetauscher ausgeführt sein oder bei entsprechender Formgebung der Wärmetauscherkanäle als baueinheitlich mit einem Leitelement ausgebildeter Wärmetauscher (siehe Fig. 4). Der Wärmetauscher umfasst eine Anzahl von vier konzentrischen Wärmetauscherkanälen 7a, 7b, 7c, 7d, die jeweils im wesentlichen kreisförmig verlaufen. Der vom Durchmesser her kleinste Tauscherkanal 7d lässt in seinem Zentrum genug Raum für den Durchtritt der Verdichterwelle. Eine bezüglich der Verdichterwelle radiale Zuleitung 8 und eine zu dieser parallele Ableitung 9 ist jeweils mit jedem der Tauscherkanäle 7a, 7b, 7c, 7d verbunden und sorgt für die Verbindung der Wärmetauscherkanäle mit einem Niedertemperatur-Kühlkreislauf. Hierbei wird das flüssige Kühlmittel über einen nicht dargestellten Wärmetauscher bis auf Umgebungslufttemperatur abgekühlt.

[0023] Zur Verbesserung des Wirkungsgrads des Wärmetauscher sind zwischen den konzentrischen Tauscherkanälen 7a, 7b, 7c, 7d jeweils Kühlrippen 10 angeordnet. Entgegen der schematischen Darstellung nach Fig. 6 verlaufen diese Kühlrippen 10 im wesentlichen über den gesamten Kreisumfang der Wärmetauscherkanäle 7a, 7b, 7c, 7d.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Ladeluftverdichtung für einen Verbrennungsmotor insbesondere eines Kraftfahrzeugs, umfassend eine Mehrzahl von wenigstens drei einander nachgeordneten Verdichterelementen (3a, 3b, 3c, 3d), und eine Welle (1) zum gemeinsamen Antrieb der Verdichterelemente (3a, 3b, 3c, 3d), **dadurch gekennzeichnet, dass** die Vorrichtung zumindest zwei mit einem Kühlmittel, insbesondere mit einem flüssigen Kühlmittel, durchströmbare Wärmetauscher (4a, 4b, 4c, 4d, 6a, 6b, 6c, 6d) umfasst, wobei jeder der Wärmetauscher (4a, 4b, 4c, 4d, 6a, 6b, 6c, 6d) zwischen zwei aufeinander folgenden Verdichterelementen (3a, 3b, 3c, 3d) angeordnet und von der Ladeluft durchströmbar ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Anzahl der Verdichterelemente (3a, 3b, 3c, 3d) und der Wärmetauscher (4a, 4b, 4c, 4d, 6a, 6b, 6c, 6d) jeweils wenigstens drei, insbesondere wenigstens vier ist.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Verdichterelemente (3a, 3b, 3c, 3d) als um die Welle drehbare Axialverdichter ausgebildet sind.
4. Vorrichtung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** zwischen zwei Verdichterelementen (3a, 3b, 3c, 3d) ein nicht drehbares Leitelement (4a, 4b, 4c, 4d, 4a', 4b', 4c', 4d') zur Führung der Ladeluft angeordnet ist.
5. Vorrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Leitelement als eine bauliche Einheit mit einem der Wärmetauscher (4a, 4b, 4c, 4d) ausgebildet ist.
6. Vorrichtung nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Leitelement (4a, 4b, 4c, 4d, 4a', 4b', 4c', 4d') einen flachen und von der Ladeluft umströmbaren Leitkörper umfasst, der einen Kanal zur Führung des Kühlmittels aufweist.
7. Vorrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Wärmetauscher (6a, 6b, 6c, 6d) in Strömungsrichtung vor oder nach dem Leitelement (4a', 4b', 4c', 4d') angeordnet ist.
8. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Wärmetauscher (4a, 4b, 4c, 4d, 6a, 6b, 6c, 6d) eine Mehrzahl von im wesentlichen konzentrischen, ringförmigen Tauscherelementen (7a, 7b, 7c, 7d) umfasst, die jeweils von dem Kühlmittel durchströmbar sind.
9. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Wärmetauscher (4a, 4b, 4c, 4d, 6a, 6b, 6c, 6d) zumindest ein im wesentlichen spiralförmiges Tauscherelement umfasst, das von dem Kühlmittel durchströmbar ist.
10. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Kühlmittel mittels eines Kühlers im wesentlichen auf eine Umgebungslufttemperatur kühlbar ist.
11. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Kühlmittel mit einem Verdampfer einer Kälteanlage eines Kraftfahrzeugs thermisch verbindbar ist.
12. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** kein herkömmlicher Ladeluftkühler in einem Ladeluftkanal

zwischen den Verdichterlementen und dem Verbrennungsmotor angeordnet ist.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

5

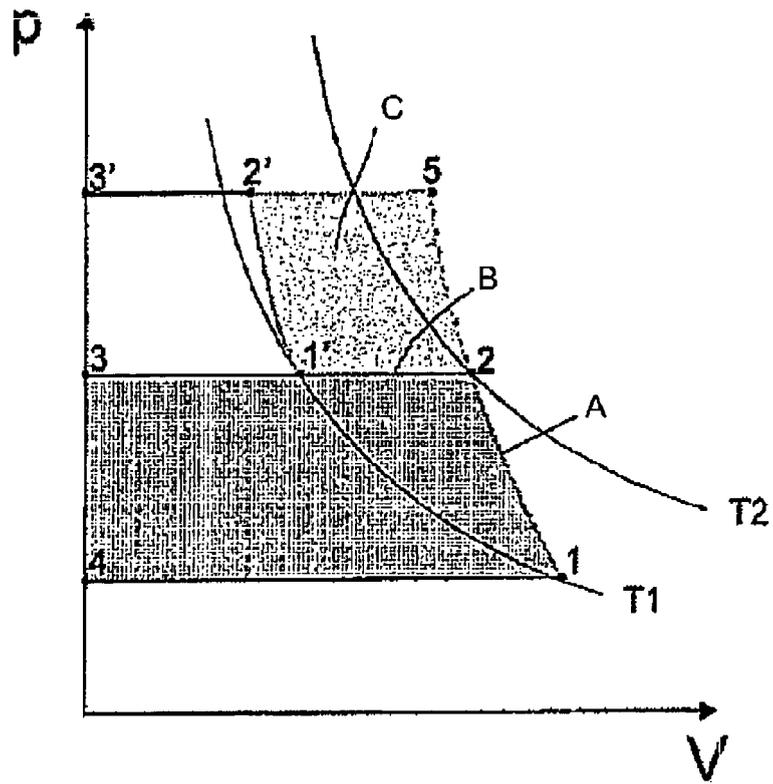


Fig. 1

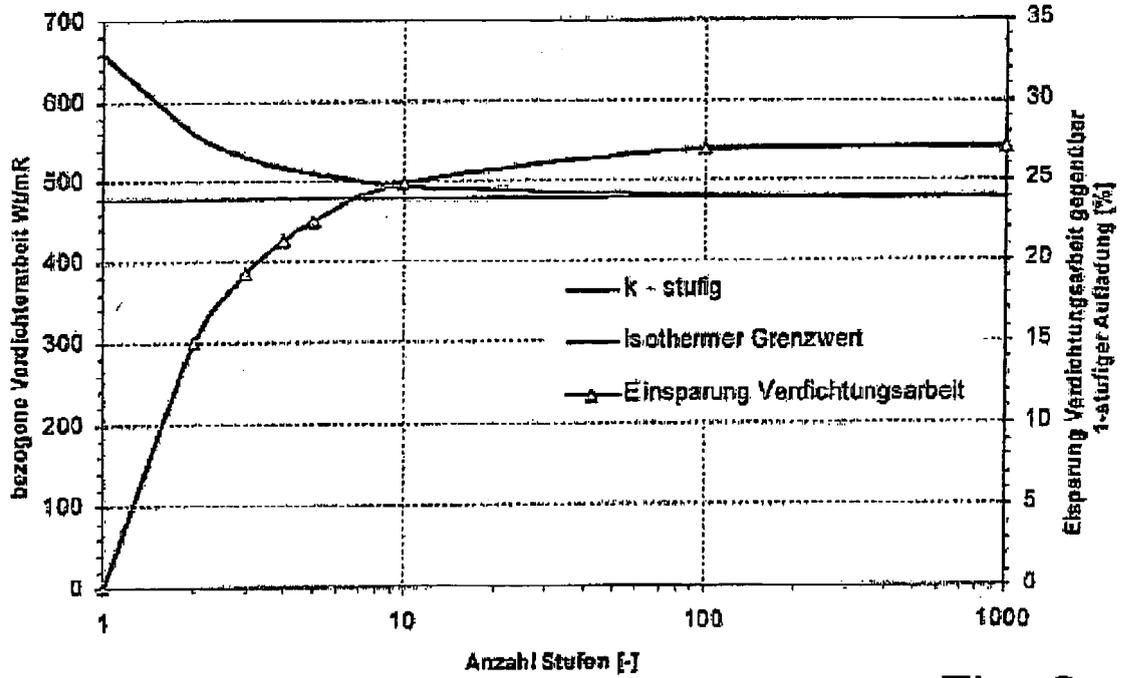


Fig. 2

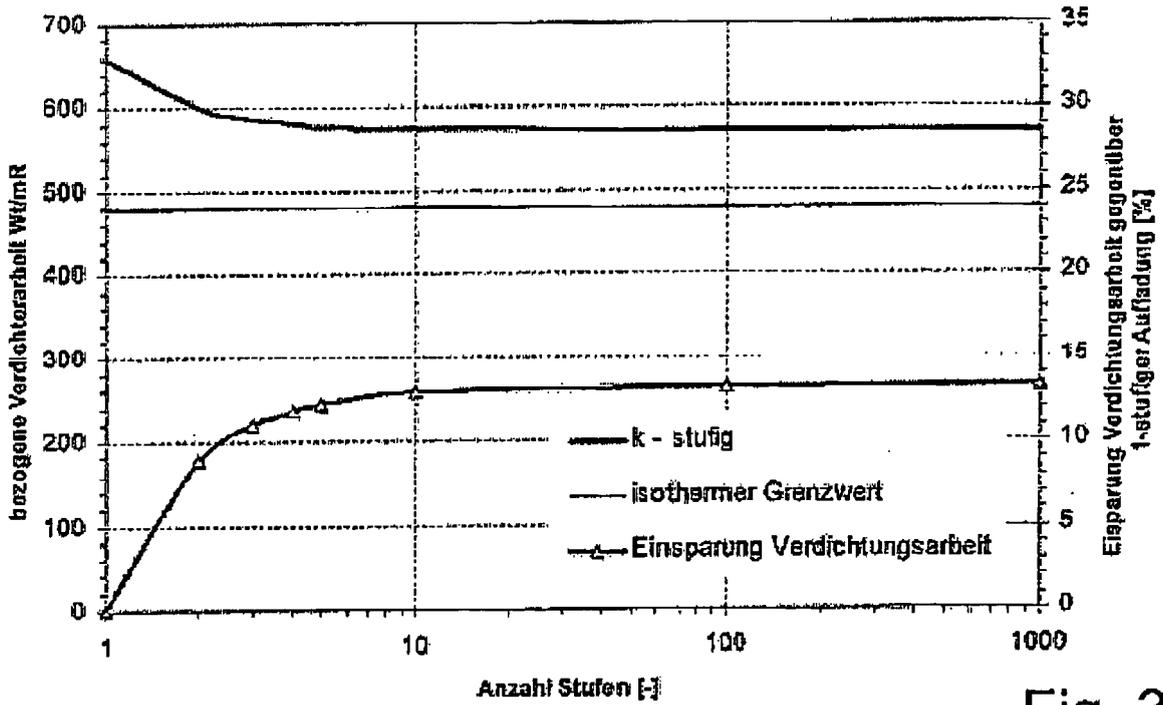


Fig. 3

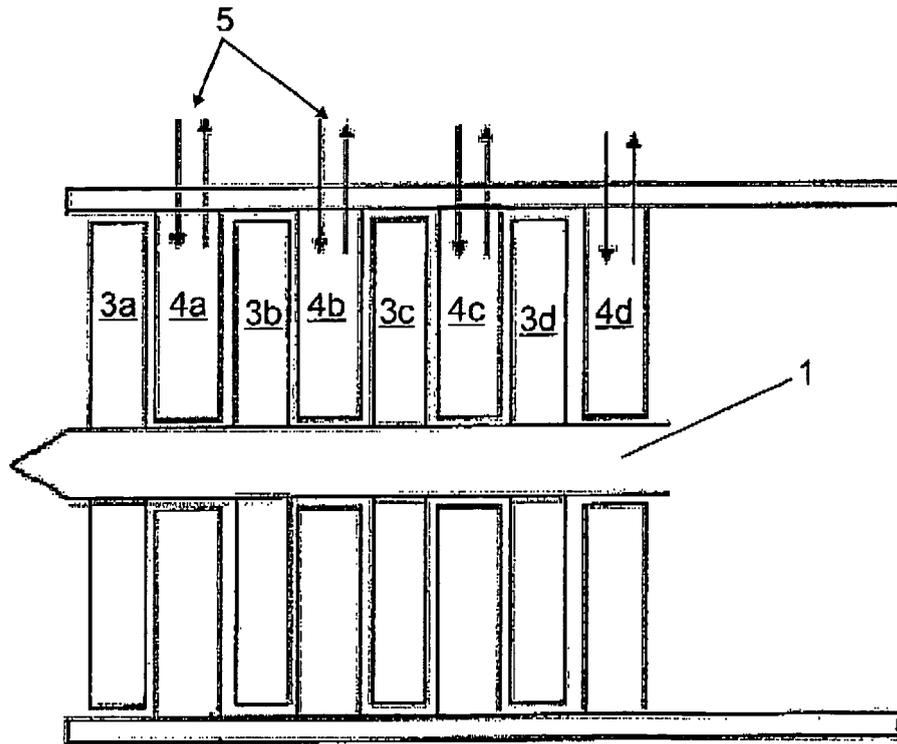


Fig. 4

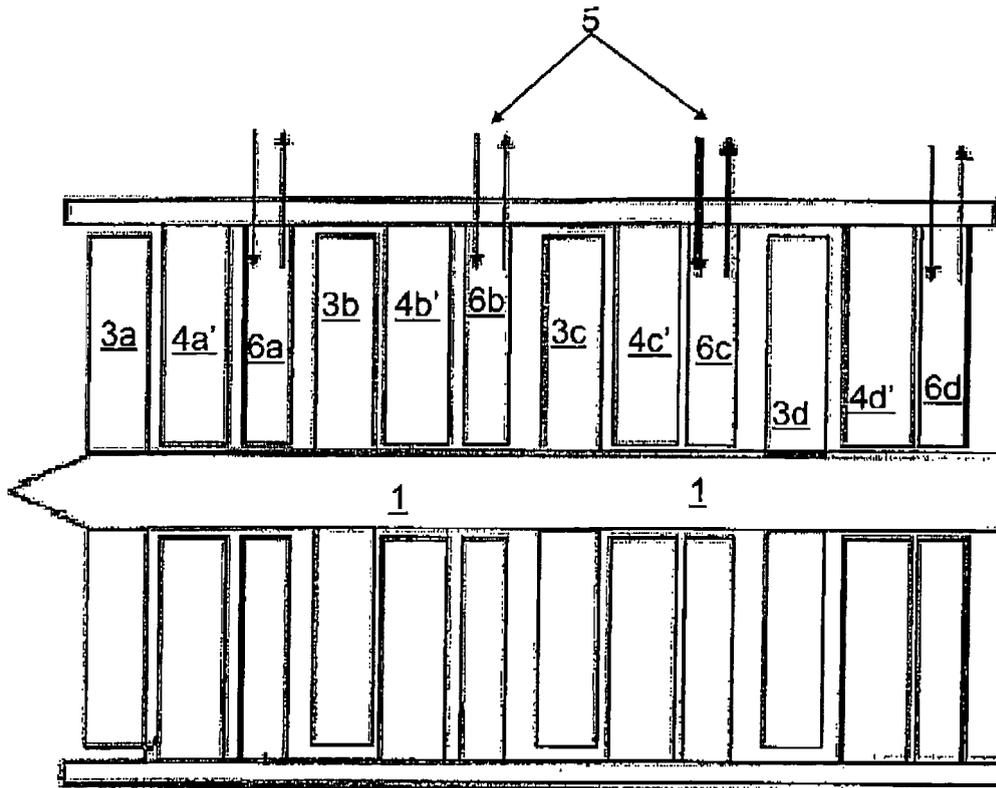


Fig. 5

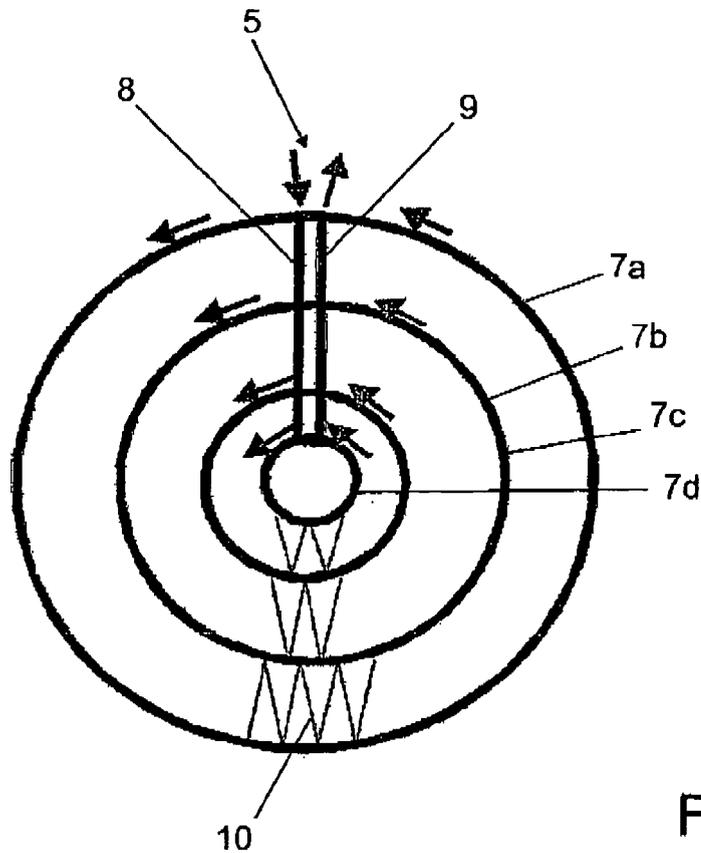


Fig. 6

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

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

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- US 6948909 B2 [0003]