

(19)



(11)

**EP 2 060 788 A1**

(12)

**EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:

**20.05.2009 Patentblatt 2009/21**

(51) Int Cl.:

**F04B 49/03** (2006.01)**F04B 49/24** (2006.01)**F04B 11/00** (2006.01)**F25J 3/04** (2006.01)(21) Anmeldenummer: **07120867.2**(22) Anmeldetag: **16.11.2007**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

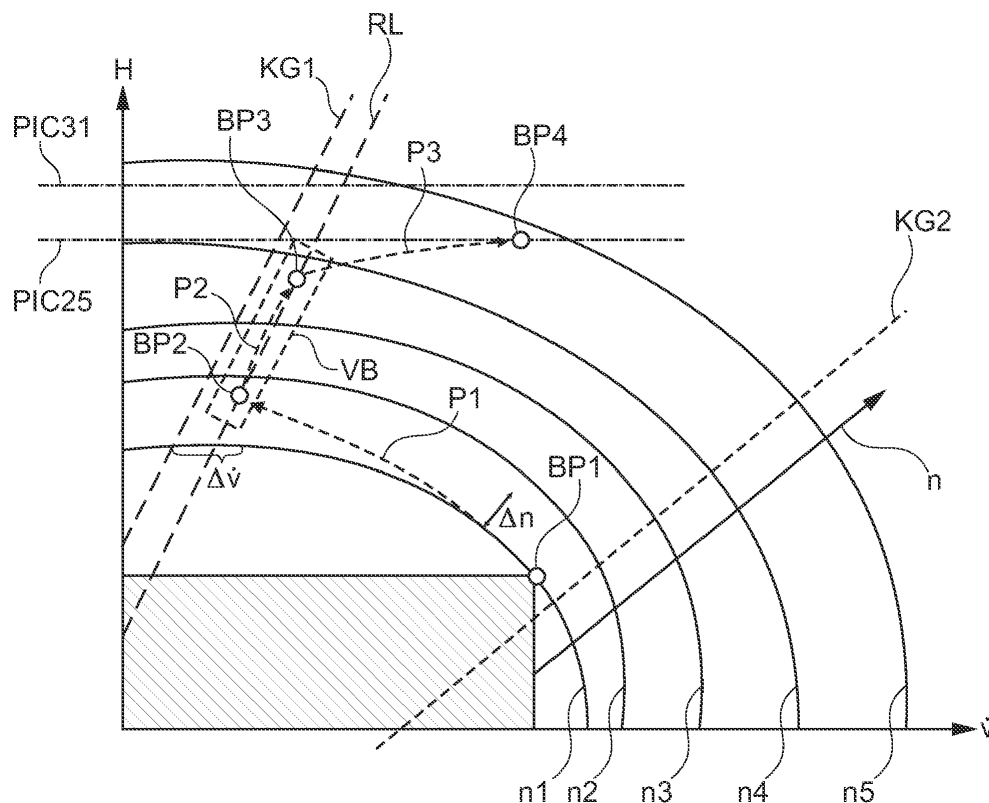
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL PL PT RO SE SI SK TR**

Benannte Erstreckungsstaaten:

**AL BA HR MK RS**(71) Anmelder: **Linde AG****80807 München (DE)**(72) Erfinder: **Haas, Sebastian****81377 München (DE)**(74) Vertreter: **Charles, Glyndwr****Reinhard, Skuhra, Weise & Partner GbR****Patent- und Rechtsanwälte****Friedrichstrasse 31****80801 München (DE)****(54) Verfahren zum Ansteuern einer Pumpenanordnung und Pumpenanordnung**

(57) Verfahren zum Ansteuern einer Pumpenanordnung mit einer ein Fluid fördernden Pumpe (2), welche einen Pumpenantrieb (26) aufweist, einer ein Bypass-Ventil (10) aufweisenden Bypass-Leitung (7), welche zur Rückführung von Fluid in ein eintrittsseitiges Reservoir (6) dient, wobei während eines Hochfahrens des Pum-

penantriebs (26) auf eine vorgegebene Zieldrehzahl ( $n_z$ ) zum Reduzieren eines Volumenstroms ( $V$ ) durch die Pumpe das Bypass-Ventil derart gesteuert wird, dass der Volumenstrom ( $V$ ) bei einer jeweiligen Förderhöhe ( $H$ ) zwischen einem Kavitationsvolumenstrom ( $KG1$ ) und dem um eine vorgegebene maximale Volumenstromabweichung ( $\Delta V$ ) erhöhten Kavitationsvolumenstrom liegt.

**Fig. 3****EP 2 060 788 A1**

## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ansteuern einer Pumpenanordnung, wie sie beispielsweise in kryotechnischen Anlagen eingesetzt wird. Die Erfindung betrifft ferner eine Anordnung mit einer oder mehreren Pumpen zum Bereitstellen von druckbeaufschlagter kryogener Flüssigkeit, wobei sich die Anordnung beispielsweise zum Einsatz in einer Luftverflüssigungsanlage eignet.

**[0002]** Die Ansteuerung und Regelung von Pumpenantrieben auf vorgegebene Sollwerte, wie zum Beispiel ein gewünschter Ausgangsdruck, in Abhängigkeit von verschiedenen messbaren Größen, wie zum Beispiel ein Differenzdruck zwischen Eintrittsseite und Austrittsseite einer Pumpe, Volumen- oder Massenströmen, Drehzahl des Pumpenantriebs o. Ä., ist insbesondere bei großtechnischen fluidverarbeitenden Anlagen notwendig. Als Pumpenantriebe sind dabei Asynchronmotoren, die mit Drehstrom betrieben werden, verbreitet. Häufig werden kryogene Pumpen, also Pumpen, die kryogene Flüssigkeiten bei Temperaturen von kleiner als  $-170^{\circ}\text{C}$ , mit entsprechenden Drehstromasynchronmaschinen betrieben. Insbesondere bei Tieftemperaturanwendungen, wie beispielsweise Luftzerlegungsanlagen, wird eine kryogene Flüssigkeit oder verflüssigte Luft, durch kryogene Pumpen auf einen vorgegebenen Betriebsdruck gebracht und dann zum Beispiel weiteren Anlageteilen, wie einem Wärmetauscher, zugeführt.

**[0003]** Um einen möglichst zuverlässigen und gleichmäßigen Druck in der kryogenen Flüssigkeit aufrecht zu erhalten, werden meist redundante Pumpen parallel eingesetzt, um beim Ausfall einer der Pumpen dennoch den notwendigen Druck im Tieftemperatursystem aufrecht zu erhalten. Zum Beispiel können redundante Pumpenpaare vorgesehen werden, bei denen eine Betriebspumpe ständig im Einsatz ist und bei deren Ausfall eine Ersatzpumpe anspringt und die ausgefallene Pumpenleistung ersetzt. Für derartige Ersatzpumpen sind so genannte Slow-Roll-Betriebsmodi bekannt, in denen der Antriebsmotor zwar aktiv ist, die Pumpe jedoch nur eine minimale Förderarbeit leistet.

**[0004]** Damit beim Ausfall der Betriebspumpe der Druck im Hochdruckbereich der entsprechenden Anlage nicht zu stark absinkt, ist es notwendig, die redundante Ersatzpumpe möglichst schnell in einen Betriebszustand zu bringen, der dem ursprünglichen Betriebszustand der Betriebspumpe entspricht. D.h. in der Regel muss die Drehzahl der Ersatzpumpe möglichst schnell die Drehzahl der ausgefallenen Betriebspumpe erreichen. Üblicherweise ist die Drehzahl der jeweiligen Pumpe, die Förderarbeit leistet, durch Betriebsvorgaben der jeweiligen Anlage bestimmt und wird in einem Regelkreis eingestellt. Die Drehzahl eines Asynchronmotors ist im Wesentlichen durch die Drehstromfrequenz vorgegeben, mit der er betrieben wird. Bei konventionellen Regelungen wird daher ein Frequenzwandler eingesetzt, der die Drehstromfrequenz für den die Pumpe antreibenden Mo-

tor bereitstellt. Eine entsprechende Regeleinrichtung setzt in Abhängigkeit von dem Druck des pumpenausgangsseitig vorliegenden Produktes die Drehstromfrequenz für die Pumpen- bzw. Asynchronmotoren fest.

**[0005]** Fällt eine Pumpe aus, muss eine Ersatzpumpe schnell auf die erforderliche Drehzahl gebracht werden. Insbesondere in der Hochfahrphase entwickelt ein entsprechender Pumpenantrieb jedoch nicht immer sein stärkstes Drehmoment, wodurch das Erreichen des gewünschten Förderergebnisses der Ersatzpumpe verzögert wird. Dadurch können pumpenausgangsseitig ungewünschte Druck- und Mengenschwankungen in dem gelieferten Produkt auftreten.

**[0006]** Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein verbessertes Verfahren zum Hochfahren von Pumpenanordnungen bereitzustellen.

**[0007]** Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß Patentanspruch 1 gelöst.

**[0008]** Demgemäß ist ein Verfahren zum Ansteuern einer Pumpenanordnung mit einer ein Fluid fördernden Pumpe, welche einen Pumpenantrieb aufweist, mit einer ein Bypassventil aufweisenden Bypassleitung vorgesehen. Die Bypassleitung dient zur Rückführung von Fluid in ein eintrittsseitiges Reservoir. Dabei wird während des Hochfahrens des Pumpenantriebs auf eine vorgegebene Zieldrehzahl das Bypass-Ventil derart gesteuert, dass der Volumenstrom durch die Pumpe bei einer jeweiligen Förderhöhe zwischen einem Kavitationsvolumenstrom und dem um eine vorgegebene maximale Volumenstromabweichung erhöhten Kavitationsvolumenstrom liegt.

**[0009]** Zum Beispiel kann eine Regellinie für den Betriebspunkt der Pumpe festgelegt werden, welche möglichst nahe einer Kavitationsgrenzlinie verläuft, wodurch eine günstige Reduktion des Volumenstroms eintritt, ohne dass Kavitation auftreten kann.

**[0010]** Insbesondere beim Betrieb von kryogenen Pumpen ist es notwendig, Kavitation zu verhindern, was durch Regelung des Volumenstroms oberhalb des Kavitationsvolumenstroms erfolgen kann. Ferner ergibt sich durch die vorgeschlagene Regelung des Bypass-Ventils, dass der Volumenstrom zumindest teilweise während des Hochfahrvorgangs reduziert wird und sich nahe einer unteren Kavitationsgrenzlinie befindet. Vorzugsweise wird das Bypass-Ventil ferner derart gesteuert, dass der Volumenstrom bei einer jeweiligen Förderhöhe in einem Volumenstrombereich liegt, welcher zwischen einem unterem Grenzvolumenstrom und dem um die vorgegebene maximale Volumenstromabweichung erhöhten Kavitationsvolumenstrom liegt.

**[0011]** Es kann zum Beispiel eine Regellinie für den Volumenstrom definiert werden, die im Wesentlichen parallel zu der unteren Kavitationsgrenzlinie verläuft. Der untere Grenzvolumenstrom liegt dann zum Beispiel zwischen der Regellinie und der Kavitationsgrenzlinie, und ein oberer Grenzvolumenstrom verläuft in einem entsprechenden Förderhöhen-Volumenstrom-Diagramm rechts von der Regellinie. Der Bereich ist derart be-

stimmt, dass auch bei Überschwängern in der Regelung der Kavitationsvolumenstrom niemals unterschritten wird.

**[0012]** Durch die Reduktion des Volumenstroms ergibt sich ein niedrigeres hydraulisches Bremsmoment wodurch eine Beschleunigung auf die Zieldrehzahl erleichtert wird. Mittelbar wird somit das hydraulische Bremsmoment in der Anlaufphase minimiert.

**[0013]** Es bietet sich zum Beispiel eine Implementierung des Verfahrens als Kavitationsgrenzregler an, welcher aus der Differenz zwischen einem Eintrittsdruck und einem Austrittsdruck der Pumpe und dem aktuellen Volumenstrom das Bypass-Ventil steuert. Durch das erfindungsgemäße Verfahren kann vorteilhaft ausgenutzt werden, dass im Anlaufvorgang des Pumpenantriebs im Wesentlichen entlang einer Kavitationsgrenzlinie verfahren wird. Dadurch wird ein besonders geringer Volumenstrom gewährleistet. Vorzugsweise wird beispielsweise ein aktueller Volumenstrom in Abhängigkeit von einer Druckdifferenz zwischen einer Eintrittsseite und einer Austrittsseite der Pumpe und/oder der aktuellen Drehzahl des Pumpenantriebs ermittelt.

**[0014]** In einer Variante des vorhergehend beschriebenen Verfahrens wird mindestens einer der folgenden Verfahrensschritte ausgeführt:

**[0015]** Bereitstellen eines geöffneten Bypassventils oder Öffnen des Bypassventils. Häufig liegt beim Ausfall einer Pumpe eine Betriebssituation vor, in der das Bypassventil zu 100% geöffnet ist. Eine als Ersatzpumpe vorgehaltene Pumpe im Slow-Roll- oder Stand-by-Betrieb hat in der Regel einen geöffneten Bypass. Ausgehend von diesem Zustand erfolgt dann eine Minimierung des Volumenstroms, um möglichst schnell die jeweilige Ersatzpumpe auf die vorgegebene Drehzahl zu bringen.

**[0016]** Vorgeben einer Zieldrehzahl eines Pumpenantriebs in Abhängigkeit von einem vorgegebenen Austrittsdruck. Ein übergeordneter Druckregler liefert beispielsweise in Abhängigkeit von dem abgefragten Produkt in der Ausgangsleitung eine Drehzahl für die Pumpe. Denkbar ist auch der Einsatz mehrerer Pumpen parallel, die eine gemeinsame Hochdruckflüssigkeitsleitung bedienen. Ein entsprechender Druckregler liefert dann eine Zieldrehzahl für diese Pumpen.

**[0017]** Reduzieren des Durchflusses des Bypass-Ventils zum Erhöhen der Förderhöhe der Pumpe und Reduzieren des Volumenstroms bei einer vorgegebenen maximalen Änderung der Drehzahl des Pumpenantriebs während einer ersten Hochfahrphase. Es kann zum Beispiel eine maximale Drehzahländerung von 10%, vorzugsweise 5%, während der ersten Hochfahrphase gewünscht sein. Das Bypass-Ventil sollte so schnell geschlossen werden, dass sich die Drehzahl nicht wesentlich erhöht. Bei einer Gesamthochfahrdauer der jeweiligen Pumpe von zum Beispiel 10 Sekunden, kann ein Schließen innerhalb von einer Sekunde erfolgen. Durch die Reduktion des Durchflusses und gleichzeitige Erhöhung der Förderhöhe nähert sich der Betriebspunkt der Pumpe der Kavitationsgrenzlinie, also in Richtung zu ei-

nem minimal möglichen Volumenstrom ohne Kavitation zu provozieren. Vorzugsweise wird in der ersten Hochfahrphase ein Betriebspunkt der Pumpe im Wesentlichen entlang einer Förderhöhen-Volumenstrom-Kennlinie der Pumpe bei konstanter Drehzahl betrieben. Zum Beispiel kann das Bypass-Ventil gerammt werden, also in einem vorgegebenen Zeitraum um eine vorgegebene Öffnung verändert werden. Es kann auch ein Sollwert für den auf das Bypass-Ventil wirkenden Regler mit einem entsprechenden zeitlichen Verlauf für die Ventilstellung in dieser ersten Hochfahrphase eingestellt werden.

**[0018]** In einer zweiten Hochfahrphase Regeln des Bypass-Ventils zum Erhöhen der Drehzahl des Pumpenantriebs derart, dass bei einer ansteigenden Förderhöhe der Volumenstrom größer ist als der Kavitationsvolumenstrom. Dabei entspricht der Kavitationsvolumenstrom einem minimal notwendigen Volumenstrom zur Vermeidung von Kavitation bei einer jeweiligen Förderhöhe. In der zweiten Phase wird somit ein minimaler akzeptabler Volumenstrom gewährleistet ohne Kavitation zu provozieren. Vorzugsweise wird die Pumpe dabei in einem Betriebspunkt in der zweiten Hochfahrphase im Wesentlichen parallel zu einer Kavitationsgrenzlinie eines Förderhöhen-Volumenstrom-Kennlinienfeldes der Pumpe betrieben.

**[0019]** Schließen des Bypass-Ventils bei Erreichen einer vorgegebenen Förderhöhe oder einem vorgegebenen Austrittsdruck in einer dritten Hochfahrphase. Sobald beispielsweise der von einem Druckregler geforderte Druck austrittsseitig erreicht ist, kann auch der Volumenstrom wieder erhöht werden, was durch Schließen des Bypassventils erzielt wird. Dies kann prinzipiell solange erfolgen, bis ein auf das Bypass-Ventil wirkender Druckregler einen Maximaldruck erfasst. Dann müsste das Bypass-Ventil geöffnet werden.

**[0020]** Grundsätzlich kann ein Schließen des Bypass-Ventils auch in anderen Betriebssituationen notwendig sein. Wenn zum Beispiel auf der Austrittsseite Fluid entnommen wird, kann die Regelung ein Reduzieren der Bypass-Ventilöffnung veranlassen.

**[0021]** Das Verfahren eignet sich insbesondere zum Einsatz bei einem Asynchronmotor als Pumpenantrieb mit einer Drehstromfrequenz, welcher der vorgegebenen Zieldrehzahl entspricht. Näherungsweise kann die aktuelle Drehzahl dabei auch durch die Synchrondrehzahl angenähert werden. Der sich ergebende Schlupf kann vernachlässigt werden.

**[0022]** Es ist ferner eine Pumpenanordnung mit mindestens einer Pumpe, einem Reservoir und einer Steuereinrichtung vorgesehen. Die Pumpe hat dabei einen Pumpenantrieb, und das Reservoir ist pumpenaustrittsseitig über eine Bypass-Leitung mit der Pumpe verbunden. Die Bypass-Leitung verfügt dabei über ein Bypass-Ventil. Ferner liefert das Reservoir pumpeneintrittsseitig zu förderndes Fluid. Die Steuereinrichtung ist dabei derart eingerichtet, dass ein vorbeschriebenes Verfahren durchgeführt wird.

**[0023]** Die Pumpenanordnung kann dabei eine Kavi-

tationsgrenzregelungseinrichtung aufweisen, welche das Bypass-Ventil in Abhängigkeit von einem aktuellen Volumenstrom durch die Pumpe und einer aktuellen Drehzahl des Pumpenantriebs der Pumpe steuert. Eine Regelung kann auch in Abhängigkeit von dem Differenzdruck zwischen Eingangs- und Ausgangsseite, der aktuellen Drehzahl und/oder der Förderhöhe erfolgen. Die Kavitationsgrenzregelungseinrichtung ist vorgesehen, da ansonsten, insbesondere bei Tieftemperaturfluiden, Schäden durch Kavitation auftreten können. Es kann darüber hinaus ein den Austrittsdruck erfassender Druckregler vorgesehen werden, welcher das Bypass-Ventil derart steuert, dass ein vorgegebener maximaler Austrittsdruck nicht überschritten wird. Die Steuerung durch die Kavitationsgrenzregelungseinrichtung sollte jedoch priorisiert sein.

**[0024]** Eine oder mehrere entsprechende Pumpenanordnungen eignen sich insbesondere zum Einsatz in Luftzerlegungsanlagen mit kryogenen Pumpen. Die Steuereinrichtung kann dabei ferner die Zieldrehzahl der jeweiligen kryogenen Pumpe in Abhängigkeit von Betriebsvorgaben für ein Verfahren zur Luftzerlegung vorgeben.

**[0025]** Insbesondere wenn Ersatzpumpen zugeschaltet werden müssen bzw. hochgefahren werden, erreicht man durch das erfindungsgemäße Vorgehen eine Minimierung des hydraulischen Momentes. Dies beschleunigt den Hochlaufprozess. Dadurch werden auftretende Druck oder Mengenschwankungen deutlich reduziert. Das Verfahren kann auch für jede Ersatz- oder Betriebspumpe bei parallel arbeitenden kryogenen Pumpen angewendet und implementiert werden.

**[0026]** In einer Variante der Erfindung ist ein Computerprogrammprodukt vorgesehen, welches die Durchführung eines entsprechenden Verfahrens zum Ansteuern eines Pumpenantriebs auf einer programmgesteuerten Rechner- oder Steuereinrichtung veranlasst. Als programmgesteuerte Rechner- oder Steuereinrichtung kommt zum Beispiel ein PC oder ein Rechner einer Leitwarte zur Steuerung und Regelung von Anlagen in Frage, auf dem entsprechende Software installiert ist. Das Computerprogrammprodukt kann beispielsweise in der Art eines Datenträgers wie zum Beispiel USB-Stick, Floppy-Disk, CD-ROM, DVD implementiert werden oder auch auf einer Servereinrichtung als herunterladbare Programmdatei implementiert sein.

**[0027]** Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche sowie der im Folgenden beschriebenen Ausführungsbeispiele der Erfindung. Im Weiteren wird die Erfindung anhand von bevorzugten Ausführungsformen unter Bezugnahme auf die beigelegten Figuren näher erläutert.

**[0028]** Es zeigt dabei:

Fig. 1: eine Darstellung einer Anlage mit mehreren steuerbaren Pumpen zum Bereitstellen einer druckbeaufschlagten kryogenen Flüssigkeit;

Fig. 2: eine schematische Darstellung einer Pumpenanordnung, welche zur Durchführung einer Variante des erfindungsgemäßen Hochfahrverfahrens geeignet ist; und

Fig. 3: ein Förderhöhen-Volumenstrom-Diagramm zur Erläuterung von Hochfahrphasen eines Pumpenantriebs.

**[0029]** Bei Luftzerlegungsanlagen mit Innenverdichtung wird zum Beispiel kryogene Luft oder Flüssigkeiten (LIN, LOX, LAR = flüssiger Stickstoff, Sauerstoff, Argon) durch Pumpen oder Fördern auf einen Betriebsdruck gebracht und einem Wärmetauscher der entsprechenden Luftzerlegungsanlage (ASU = Air Separation Unit) zugeführt. Die entsprechende kryogene Flüssigkeit wird dann darin verdampft. Um beim Ausfall einer der Pumpen dennoch den jeweiligen Prozess weiterführen zu können, sind redundante Pumpen vorgesehen, die beim Ausfall der eigentlichen Betriebspumpe als Ersatzpumpe einspringen. Es ist auch denkbar, dass von einem gemeinsamen Reservoir oder Tank mehrere einzelne Anlagenteile mit kryogener Flüssigkeit unter Druck beliefert werden. Dies ist zum Beispiel in der Figur 1 schematisch dargestellt.

**[0030]** Es ist eine gemeinsame Hochdruckflüssigleitung 1 vorgesehen, die von drei Pumpen 2, 3, 4 mit Hochdruckflüssigkeit versorgt wird. Die Pumpen beziehen das jeweilige Produkt über eine Zuleitung 5 von einem gemeinsamen Reservoir oder Tank 6. Für jede Pumpe ist ein Bypass-Rücklauf 7, 8, 9 mit jeweils einem druckgesteuerten Ventil 10, 11, 12 vorgesehen. Jede Pumpe 2, 3, 4 ist ferner über ein Rückschlagventil 13, 14, 15 gegenüber der gemeinsamen Hochdruckflüssigleitung 1 gesichert.

**[0031]** An die gemeinsame Hochdruckflüssigleitung 1 sind in dem Beispiel der Figur 1 drei Anlagenteile angekoppelt. Beispielsweise sind zwei Wärmetauscher 16, 17 von Luftzerlegungsanlagen und ein Back-Up-System 18 an die gemeinsame Hochdruckflüssigleitung 1 gekoppelt. Gasseitig wird dabei jeweils der Produktdruck über druckgesteuerte Ventile 19, 20 geregelt. Die jeweils erforderliche Produktmenge wird ebenfalls über Ventile 21, 22 gesteuert. Ähnlich erfolgt eine Entnahme von Hochdruckflüssigkeit aus der gemeinsamen Leitung 1 durch das Back-Up-System 18 über ein von einem Regler 23 gesteuertes Ventil 24.

**[0032]** Über eine Steuereinrichtung 25 wird der erforderliche Druck durch Ansteuerung der Pumpen 2, 3, 4 in der gemeinsamen Hochdruckleitung 1 geregelt. Im Normalbetrieb sind dabei zum Beispiel die Pumpen-Bypässe 8, 9 geschlossen, und für die Pumpen bzw. die darin eingesetzten Asynchronmotoren ist eine geeignete Drehstromfrequenz vorgegeben. Die Ersatzpumpe 2 arbeitet dann zum Beispiel in einem Slow-Roll-Modus, und das zugehörige Bypass-Ventil ist zu 100% geöffnet. In der Regel entspricht die Anzahl der vorgehaltenen Pumpen 2, 3, 4 der Anzahl der aus der gemeinsamen Hoch-

druckleitung 1 entnehmenden Teilanlagen 16, 17. Ist der Einsatz des Back-Up-System notwendig, muss auch die dritte Pumpe hochgefahren werden.

**[0033]** Falls eine Pumpe ausfällt, muss eine redundante Ersatzpumpe möglichst schnell hochfahren, um die Druckschwankungen in der gemeinsamen Flüssigleitung 1 zu minimieren. Im Normalbetrieb gibt der Regler oder die Steuereinrichtung 25 an die Pumpen eine vorgegebene Drehstromfrequenz  $n_{syn}$  in Abhängigkeit von den Betriebsvorgaben der angeschlossenen weiteren Anlagenteile aus.

**[0034]** In der Figur 2 ist eine schematische Darstellung einer Pumpenanordnung im Ausschnitt dargestellt, wie sie zum Beispiel in der Figur 1 für die Pumpen 2, 3, 4 ausgeführt sein kann.

**[0035]** Dabei entsprechen gleiche Bezugszeichen den in der Figur 1 dargestellten Elementen. Die Pumpe 2 ist von einem Motor 26 angetrieben, wobei die jeweilige Drehzahl über ein Steuersignal CT3 von einer Auswerteeinrichtung 27 gesteuert wird. Der Druckregler 25, welcher den Austrittsdruck der gemeinsamen Flüssigkeitsleitung 1 misst, liefert eine Zieldrehzahl  $NZ$  an die Auswerteeinrichtung 27. Ferner wird über einen Geschwindigkeitssensor 28 die aktuelle Drehzahl  $n_{akt}$  des Motors 26 geliefert.

**[0036]** Prinzipiell kann in Abhängigkeit von der aktuellen Drehzahl  $n_{akt}$  und der gewünschten Drehzahl  $n_z$  der Motor 26 vorzugsweise in einen Betriebsbereich gefahren werden, in dem sein Drehmoment prinzipiell maximal ist. In der Startphase, also beim Zuschalten des Antriebs 26 einer Ersatzpumpe 2, kann dies zum Beispiel erreicht werden, indem der als Asynchronmotor ausgeführte Antrieb 26 in der Nähe seines Kippunktes betrieben wird.

**[0037]** Darüber hinaus ist eine Kavitationsgrenzregelung vorgesehen mit einer Kavitationsgrenzeinrichtung 30, die ein Steuersignal CT1 an die Regeleinrichtung bzw. Abfrageeinrichtung 32, welche das Bypass-Ventil bedient, liefert. Ferner ist pumpeneintrittsseitig ein Druckmesser 29 vorgesehen, welcher den Eintrittsdruck  $p_i$  misst und der Kavitationsgrenzeinrichtung 30 liefert. Genauso ist austrittsseitig ein Druckregler 31 vorgesehen, der einerseits den Austrittsdruck  $p_o$  an den Kavitationsgrenzregler 30 liefert und andererseits ein Steuersignal CT2 an die Regeleinrichtung 32 übermittelt, um bei einem Übertreten eines maximal zulässigen Austrittsdrucks das Bypass-Ventil 10 zu öffnen. Die verschiedenen Regelungsmechanismen wie Kavitationsgrenzregelung und Druckregler 31 für das Bypass-Ventil 10 können prinzipiell unabhängig voneinander erfolgen, wobei jedoch der Kavitationsgrenzregler 30 ein gegenüber dem Steuersignal CT2 priorisiertes Steuersignal CT1 liefert. Es ist zum Beispiel möglich, dass der Regler 32 immer eine Maximumauswahl zwischen den Werten des Steuersignals CT1 von dem Kavitationsgrenzregler 30 und des Steuersignals CT2 von dem Druckregler 31 vornimmt. Dadurch ist sicher gestellt, dass keine Kavitation auftritt, und dennoch sowohl der Ausgangsdruck zuverlässig geregelt wird.

**[0038]** Der als Druckregler (PIC) dargestellte Regler 31 kann in anderen Ausführungsformen einer entsprechenden Pumpenanordnung auch als Handregler (HIC) ausgeführt werden.

**[0039]** Die von der Pumpe gelieferte Förderleistung  $P_Q$  ergibt sich aus dem Volumenstrom  $\dot{V}$  und der spezifischen Förderarbeit  $Y$ , welche die in die Strömung eingeprägte Arbeit darstellt. Dies kann durch folgende Gleichung dargestellt werden:

$$P_Q = \rho \cdot \dot{V} \cdot Y = \rho \cdot g \cdot \dot{V} \cdot H \approx \dot{V} \cdot \Delta p.$$

**[0040]** Dabei steht  $p$  für die Dichte des Fluides,  $g$  für die Erdbeschleunigung und  $H$  für die Förderhöhe, welche sich aus der spezifischen Förderarbeit ableiten lässt. Die Förderhöhe  $H$  kann auch über die Druckdifferenz zwischen dem Austrittsdruck und dem Eintrittsdruck  $\Delta p = p_o - p_i$  angenähert werden. Die entsprechenden Größen sind, wie in der Figur 2 dargestellt ist, über entsprechenden Sensoren oder Regler zugänglich.

**[0041]** Die von der Pumpe aufzubringende hydraulische Leistung  $P_Q$  ergibt sich aus der mechanischen Leistung  $P_M$  multipliziert mit dem Wirkungsgrad  $\eta$ . Um in der Hochfahrphase der Pumpe eine möglichst geringe Leistung abzuverlangen und damit eine schnelle Drehzahlerhöhung zu ermöglichen, wird zum Beispiel vorgeschlagen, den Volumenstrom  $\dot{V}$  zu erniedrigen bzw. gering zu halten. Die mechanische Leistung ergibt sich aus dem von dem Pumpenantrieb 26 entwickelten Drehmoment  $MH$  multipliziert mit der Winkelgeschwindigkeit  $P_M = MH \cdot \omega$ . Daher ergibt sich der Zusammenhang:

$$MH \cdot \omega \approx \dot{V} \cdot \Delta p.$$

**[0042]** Somit ergibt sich durch einen geringen Volumenstrom  $\dot{V}$  ein geringeres notwendiges Drehmoment  $MH$  bzw. Bremsmoment durch den Pumpenantrieb 26. Dies gilt insbesondere für Pumpen mit einer flachen Kennlinie. Die Figur 3 stellt anhand eines Förderhöhen-Volumenstrom-Diagramms einen möglichen Verlauf des Betriebspunktes einer hochfahrenden Pumpe gemäß einer Variante des Verfahrens zum Hochfahren eines Pumpenantriebs 26 dar.

**[0043]** Die Figur 3 zeigt die entsprechenden Kennlinien  $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5$  in dem Förderhöhen-Volumenstrom-Diagramm, wobei  $n_1$ - $n_5$  für verschiedene Drehzahlen des Pumpenantriebs 26 stehen. Auf der X-Achse ist der Volumenstrom  $\dot{V}$  und auf der Y-Achse die Förderhöhe  $H$  angegeben. Die Förderhöhe  $H$  ist in der Regel proportional zu  $n^2$ , wenn ein konstanter Wirkungsgrad  $\eta$  angenommen werden kann. Mit steigender Drehzahl  $n$  vergrößern sich die von den Kennlinien  $n_1$ - $n_5$  umschlossenen Flächen in der Ebene.  $n_1$  kann zum Beispiel als

mögliche Slow-Roll-Drehzahl 45% - 50% der maximal gewünschten Drehzahl  $n_5$  entsprechen. Es sind ferner zwei Kavitationsgrenzlinien KG1 und KG2 dargestellt. Unterschreitet bei einer vorgegebenen Drehzahl, beispielsweise  $n_2$  der Volumenstrom  $\dot{V}$  die Kavitationsgrenzlinie KG1, besteht großes Kavitationsrisiko und damit eine Zerstörungsgefahr für die Pumpe. Das sich ergebende Bremsmoment lässt sich anhand der Figur 3 durch die Rechteckfläche illustrieren, die bei einem vorgegebenen Betriebspunkt, zum Beispiel BP1, durch den Betriebspunkt und den Ursprung des Diagramms festgelegt ist.

**[0044]** Der aktuelle Volumenstrom  $\dot{V}$  kann aus einem Diagramm des Pumpenherstellers über die Drehzahl  $n$  und den Differenzdruck  $\Delta p$  ermittelt werden. Da diese Größen dem Kavitationsgrenzregler 30, wie in der Figur 2 dargestellt ist, zugeführt sind, kann dieser ein Unterschreiten der Kavitationsgrenzlinie KG1 durch Öffnen des Bypass-Ventils 10 unterbinden. Im Normalbetrieb, wenn ausreichend Produkt aus der Flüssigkeitsleitung 1 entnommen wird, ist das Bypass-Ventil in der Regel vollständig geschlossen, der Kavitationsgrenzregler 30 gibt über das Steuersignal CT1 dann 0% Öffnung an.

**[0045]** In einer ersten Hochfahrphase, welche in der Figur 3 durch P1 als gestrichelter Pfeil angedeutet ist, wird das Bypass-Ventil 10 derart gesteuert, dass die Drehzahl nur um einen geringen Wert  $\Delta n$ , ausgehend von der aktuellen Drehzahl  $n_1$  schwankt und ausgehend von BP1 ein Betriebspunkt BP2 erreicht wird, der einen um den minimal notwendigen Volumenstrom der Kavitationsgrenzlinie KG1 (Kavitationsvolumenstrom) erhöhten Volumenstrom bei der vorgegebenen Förderhöhe aufweist. Zum Beispiel kann festgelegt werden, dass die Drehzahl  $n_{akt}$  nicht stärker als 10%, vorzugsweise 5%, schwanken soll. Es wird ein Abstand gemäß einer Regellinie von dem Kavitationsvolumenstrom gewährleistet. Der Abstand ergibt dabei sich derart, dass auch außergewöhnliche Schwankungen im Betrieb der Pumpe nicht ein Volumenstrom unterhalb der Kavitationsgrenzlinie verursachen können.

**[0046]** Ausgehend von einem vollständig geöffneten Bypass-Ventil 10 wird dieses während der ersten Hochfahrphase P1 geschlossen bzw. der Durchfluss reduziert. Während dieser ersten Hochfahrphase P1 wird die Drehzahl nur gering um  $\Delta n$  erhöht, wobei jedoch der Volumenstrom  $\dot{V}$  erheblich reduziert wird, was zu einem geringen hydraulischen Bremsmoment PM führt.

**[0047]** Im weiteren Verlauf des Hochfahrvorgangs in einer zweiten Hochfahrphase P2 wird ausgehend vom Betriebspunkt BP2 die Bypass-Ventilstellung 10 derart geregelt, dass ein Betriebspunkt BP3 erreicht wird, der einen höheren Volumenstrom und eine höhere Förderhöhe  $H$  als der Betriebspunkt BP2 hat. Im Wesentlichen erfolgt eine Regelung des Bypass-Ventils derart, dass der Betriebspunkt parallel zu der Kavitationsgrenzlinie KG1 verläuft. Dabei wird ein Abstand im Volumenstrom von der Kavitationsgrenzlinie KG1 eingehalten. Die entsprechenden Regelparameter, um die Pumpe gemäß

der zweiten Hochfahrphase P2 zu steuern, können zum Beispiel in dynamischen Simulationen oder experimentell ermittelt und optimiert werden.

**[0048]** Es ist dazu ferner eine Regellinie RL dargestellt, die parallel zu der oberen Kavitationsgrenzlinie KG1 in einem Abstand  $\Delta \dot{V} - d\dot{V}$  verläuft, wobei  $\Delta \dot{V} > d\dot{V}$  ist. Um die Regellinie RL ist dadurch ein Bereich VB definiert, den der Betriebspunkt während der zweiten Hochfahrphase P2 nicht verlassen soll. Ein unterer Grenzvolumenstrom ist dann durch  $RL - d\dot{V}$  und ein oberer Grenzvolumenstrom durch  $RL + d\dot{V}$  gegeben. Die Regellinie RL entspricht dabei vorzugsweise einem Volumenstrom  $\dot{V}$ , der 2%-10% über dem jeweiligen Kavitationsvolumenstrom liegt.  $d\dot{V}$  hängt dabei von den Regelparametern, der Regelungsgenauigkeit und der tatsächlichen Implementierung der Anlage ab. Es soll ein möglichst enger Bereich rechts der Kavitationslinie für den Betriebspunkt gewährleistet sein.

**[0049]** In einer dritten Hochfahrphase P3 ist der Austrittsdruck der Pumpe ausreichend angestiegen, so dass Fluid in das Produktnetz bzw. die Förderleitung 1 gefördert wird. Der Volumenstrom  $\dot{V}$  steigt nun stärker an und das Bypass-Ventil wird geschlossen. Dies erfolgt zum Beispiel durch den Druckregler 31 der auf Set-Point-High (SPH) gesetzt ist. Durch Erhöhung der Drehzahl wird der Betriebspunkt BP4 erreicht. Der Betriebspunkt BP4 liegt dabei auf einer Förderhöhe bzw. entspricht einem Austrittsdruck, der dem Sollwert des auf die Pumpendrehzahl wirkenden Druckreglers 25 entspricht. Dies ist über die gestrichpunktete Linie PIC25 angedeutet. Die weitere horizontale, gestrichpunktete Kurve PIC31 in dem Förderhöhen-Volumenstrom-Diagramm der Figur 3 entspricht dem Sollwert des auf das Bypass-Ventil wirkenden Druckreglers 31.

**[0050]** Durch den Verlauf des Betriebspunktes entlang der Trajektorien P1, P2, P3 und Durchfahren der Betriebspunkte BP1, BP2, BP3, BP4 wird ein besonders geringer Volumenstrom während der Hochfahrphase erreicht. Dadurch muss der Motor nur ein geringes Drehmoment entwickeln bzw. eine geringe hydraulische Leistung bereitstellen. In der Folge wird das Hochfahren oder Anfahren von entsprechend angesteuerten Pumpen beschleunigt.

**[0051]** Die Erfindung schafft somit ein Verfahren, welches in den entsprechenden Regelungs- oder Leitstellenrechnern von Anlagen implementiert werden kann, und eine Minimierung der Hochlaufdauer eines Pumpenantriebs, insbesondere von kryogenen Innenverdichtungskreiselpumpen ermöglicht. Das Verfahren lässt sich sowohl auf Einzelpumpen wie auch auf redundante Ersatzpumpen bei mehreren gleichzeitig betriebenen Pumpen einsetzen und reduziert Druck- und Produktmengenschwankungen ausgangsseitig. Das Verfahren lässt sich auch einfach in bestehende Regelungskonzepte einbinden und ist unabhängig von der Anzahl der eingesetzten und betriebenen Pumpen. Eine entsprechende analoge Kavitationsgrenzregelung für die obere Kavitationsgrenze KG2 verhindert zudem bei groß di-

mensionierten Bypass-Ventilen mögliche Schäden durch Kavitationen am jeweiligen Pumpenlaufrad, wenn beispielsweise eine Ersatzpumpe im Slow-Roll-Modus läuft. Es kann zum Beispiel in weiteren Betriebssituationen analog ein Bereich knapp unterhalb des oberen Kavitationsvolumenstroms KG2 bestimmt werden, in dem ein Betriebspunkt verlaufen soll.

**[0052]** Obwohl die vorliegende Erfindung anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele näher erläutert wurde, ist sie nicht darauf beschränkt sondern vielfältig modifizierbar. Insbesondere die dargestellten Topologien der Regelkreise kann verändert werden. Auch die Anwendung auf kryogene Pumpen ist nicht einschränkend zu verstehen.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Ansteuern einer Pumpenanordnung mit einer ein Fluid fördernden Pumpe (2), welche einen Pumpenantrieb (26) aufweist, einer ein Bypass-Ventil (10) aufweisenden Bypass-Leitung (7), welche zur Rückführung von Fluid in ein eintrittsseitiges Reservoir (6) dient, wobei während eines Hochfahrens des Pumpenantriebs (26) auf eine vorgegebene Zieldrehzahl (nz) zum Reduzieren eines Volumenstroms ( $\dot{V}$ ) durch die Pumpe das Bypass-Ventil derart gesteuert wird, dass der Volumenstrom ( $\dot{V}$ ) bei einer jeweiligen Förderhöhe (H) zwischen einem Kavitationsvolumenstrom (KG1) und dem um eine vorgegebene maximale Volumenstromabweichung ( $\Delta V$ ) erhöhten Kavitationsvolumenstrom liegt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Bypass-Ventil derart gesteuert wird, dass der Volumenstrom ( $\dot{V}$ ) bei einer jeweiligen Förderhöhe (H) in einem Volumenstrombereich (VB) liegt, welcher zwischen einem unterem Grenzvolumenstrom ( $KG1 + \Delta V - 2dV$ ) und dem um die vorgegebene maximale Volumenstromabweichung ( $\Delta V$ ) erhöhten Kavitationsvolumenstrom (KG1) liegt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei die folgenden Verfahrensschritte durchgeführt werden:
  - Bereitstellen einer Pumpe mit einem geöffnetem Bypass-Ventil (10);
  - Vorgeben einer Zieldrehzahl (nz) eines Pumpenantriebs (26) in Abhängigkeit von einem vorgegebenen Austrittsdruck ( $P_O$ );
  - Reduzieren des Durchflusses des Bypass-Ventils (10) zum Erhöhen der Förderhöhe (H) der Pumpe (2) und Reduzieren des Volumenstroms ( $\dot{V}$ ) bei einer vorgegebenen maximalen Änderung der Drehzahl ( $\Delta n$ ) des Pumpenantriebs (26) während einer ersten Hochfahrphase;
  - Regeln des Bypass-Ventils (10) zum Erhöhen

der Drehzahl (n) des Pumpenantriebs (26) derart, dass bei einer ansteigenden Förderhöhe (H) der Volumenstrom ( $\dot{V}$ ) größer ist als der Kavitationsvolumenstrom, welcher einem minimal notwendigen Volumenstrom zur Vermeidung von Kavitation bei einer jeweiligen Förderhöhe (H) entspricht, in einer zweiten Hochfahrphase; und - Schließen des Bypass-Ventils (10) bei Erreichen einer vorgegebenen Förderhöhe (H) oder einem vorgegebenen Austrittsdruck ( $P_O$ ) in einer dritten Hochfahrphase.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei ein Betriebspunkt (BP1-BP2) der Pumpe (29) in der ersten Hochfahrphase im Wesentlichen entlang einer Förderhöhen-Volumenstrom-Kennlinie ( $n_1$ ) der Pumpe (2) bei konstanter Drehzahl betrieben wird.
5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, wobei ein Betriebspunkt (BP2-BP3) der Pumpe (2) in der zweiten Hochfahrphase im Wesentlichen parallel zu einer Kavitationsgrenzlinie (KG1) eines Förderhöhen-Volumenstrom-Kennlinienfeldes der Pumpe (2) betrieben wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 - 5, wobei ein aktueller Volumenstrom ( $\dot{V}$ ) in Abhängigkeit von einer Druckdifferenz ( $\Delta p$ ) zwischen einer Eintrittsseite und einer Austrittsseite der Pumpe (2) und der aktuellen Drehzahl ( $n_{akt}$ ) des Pumpenantriebs (26) ermittelt wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 - 6, ferner einen Verfahrensschritt umfassend: Betreiben eines Asynchronmotors als Pumpenantrieb (26) mit einer Drehstromfrequenz, welcher der vorgegebenen Zieldrehzahl (nz) entspricht.
8. Pumpenanordnung mit mindestens einer Pumpe (2) mit einem Pumpenantrieb (26), einem Reservoir (6), welches austrittsseitig über eine Bypass-Leitung (7) mit einem Bypass-Ventil (10) eintrittsseitig zu förderndes Fluid liefert, und einer Steuereinrichtung, welche derart eingerichtet ist, dass ein Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche durchgeführt wird.
9. Pumpenanordnung nach Anspruch 8, wobei eine Kavitationsgrenzregelungseinrichtung (30) vorgesehen ist, welche das Bypass-Ventil (10) in Abhängigkeit von einem aktuellen Volumenstrom ( $\dot{V}$ ) durch die Pumpe (2) und einer aktuellen Drehzahl ( $n_{akt}$ ) eines Pumpenantriebs (26) der Pumpe (2) steuert.
10. Pumpenanordnung nach Anspruch 9, wobei ein den Austrittsdruck ( $P_O$ ) erfassender Druckregelungseinrichtung (31) das Bypass-Ventil (10) derart steuert, dass ein vorgegebener maximaler Austrittsdruck

( $P_O$ ) nicht überschritten wird, wobei die Steuerung durch die Kavitationsgrenzreglereinrichtung (30) priorisiert ist.

11. Luftzerlegungsanlage, welche mindestens eine Pumpenanordnung nach einem der Ansprüche 8 - 10 mit einer kryogenen Pumpe (2, 3, 4) aufweist, wobei die Steuereinrichtung ferner die Zieldrehzahl (nz) der kryogenen Pumpe (2, 3, 4) in Abhängigkeit von Betriebsvorgaben für ein Verfahren zur Luftzerlegung vorgibt.

15

20

25

30

35

40

45

50

55



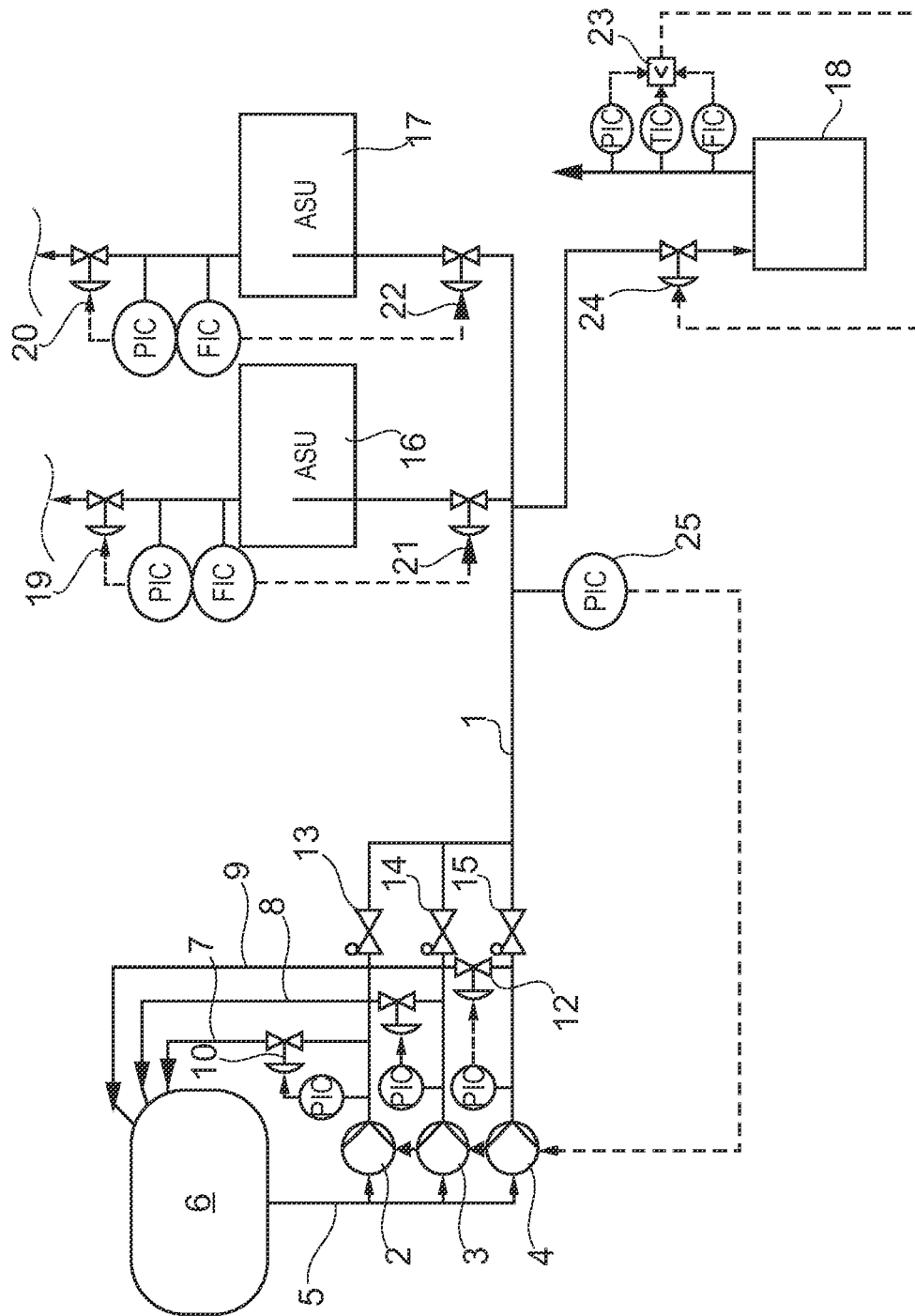


Fig. 1

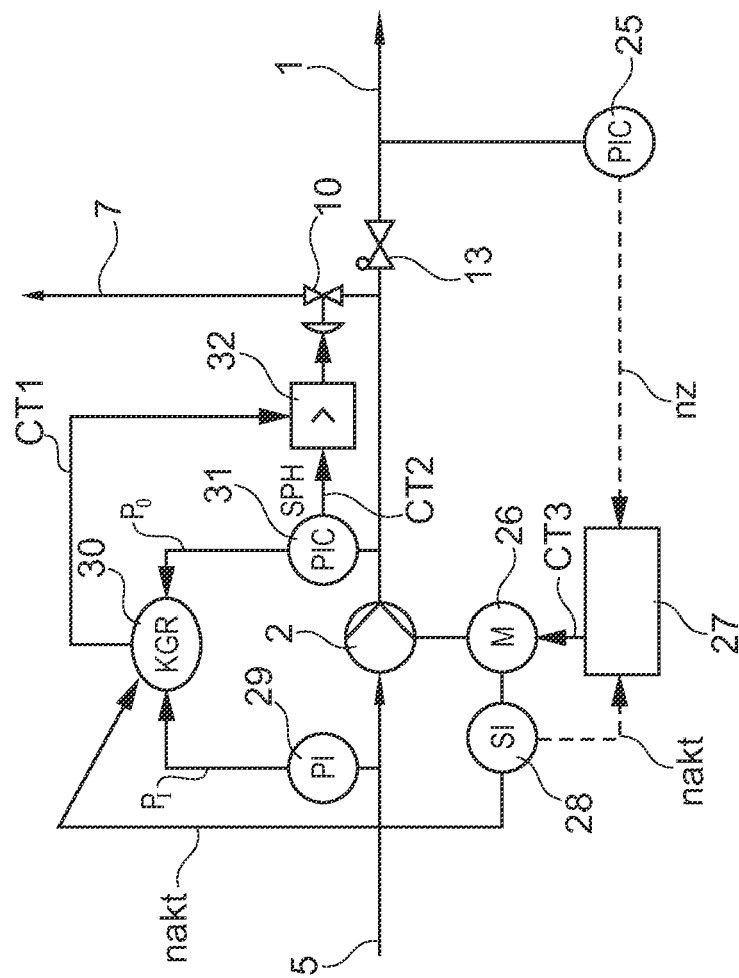


Fig. 2

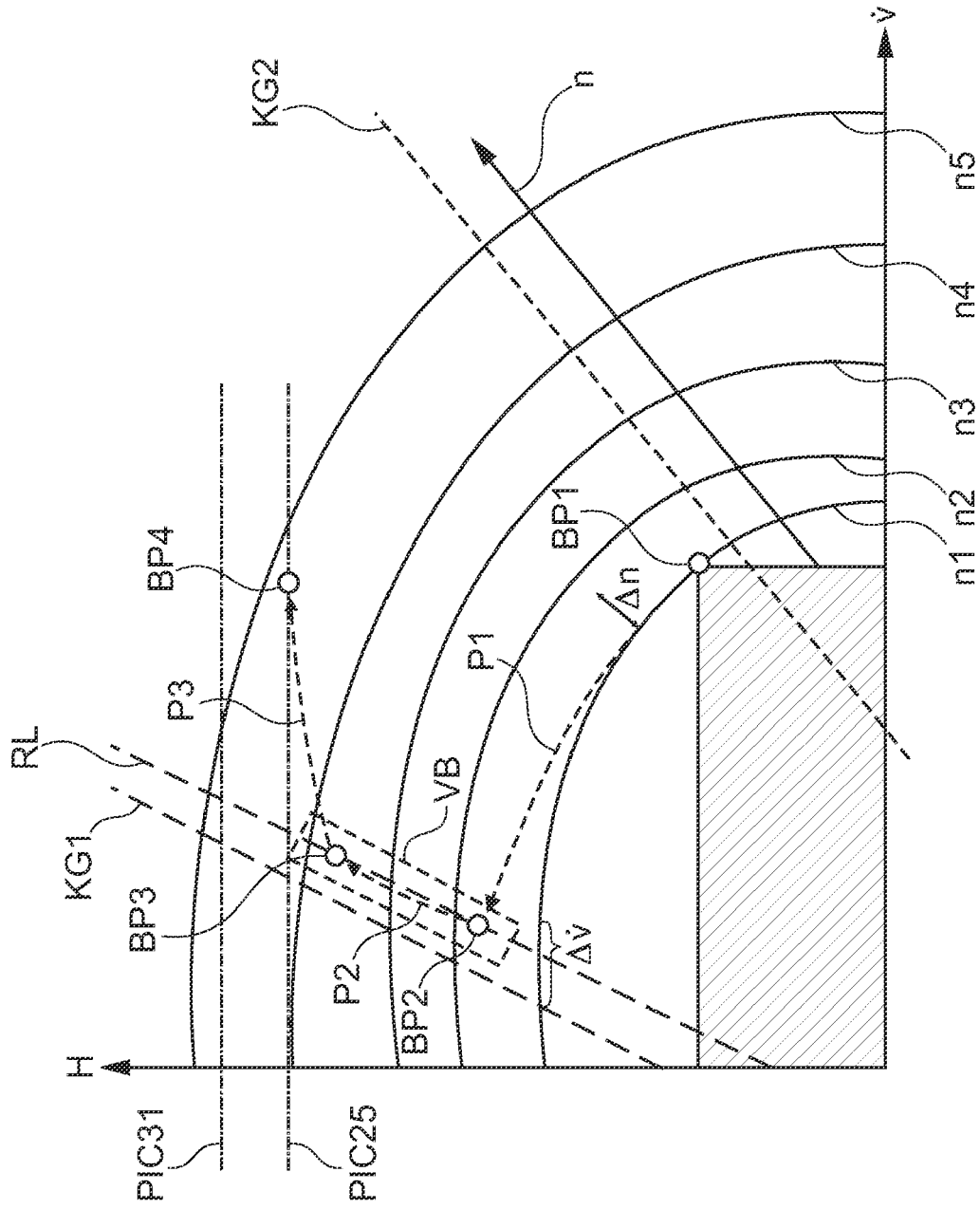


Fig. 3



Europäisches  
Patentamt

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 07 12 0867

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
A	US 2007/186566 A1 (ALLIDIERES LAURENT [FR]) 16. August 2007 (2007-08-16) * Absätze [0009] - [0012]; Anspruch 1; Abbildung 1 *	1-11	INV. F04B49/03 F04B49/24 F04B11/00 F25J3/04
A	----- EP 0 010 464 A (AIR LIQUIDE [FR]) 30. April 1980 (1980-04-30) * das ganze Dokument *	1-11	
A	----- DE 102 28 673 A1 (HOLTER GMBH & CO [DE]) 5. Februar 2004 (2004-02-05) * das ganze Dokument *	1-11	
	-----		
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			F04B F25J
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort <b>München</b>		Abschlußdatum der Recherche <b>14. April 2008</b>	Prüfer <b>Olona Laglera, C</b>
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument ..... & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

1  
EPO FORM 1503 03 82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT  
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 07 12 0867

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.  
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am  
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

14-04-2008

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2007186566 A1	16-08-2007	CA 2557948 A1	15-09-2005
		EP 1723336 A1	22-11-2006
		FR 2866929 A1	02-09-2005
		WO 2005085637 A1	15-09-2005
		JP 2007525619 T	06-09-2007
EP 0010464 A	30-04-1980	FR 2439881 A1	23-05-1980
		JP 55057696 A	28-04-1980
DE 10228673 A1	05-02-2004	KEINE	

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82