

12

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

21 Anmeldenummer: 86115792.3

51 Int. Cl.4: F04D 27/02

22 Anmeldetag: 13.11.86

30 Priorität: 13.11.85 DE 3540285

43 Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
27.05.87 Patentblatt 87/22

84 Benannte Vertragsstaaten:  
CH DE FR GB IT LI NL

71 Anmelder: MAN GUTEHOFFNUNGSHÜTTE  
GMBH

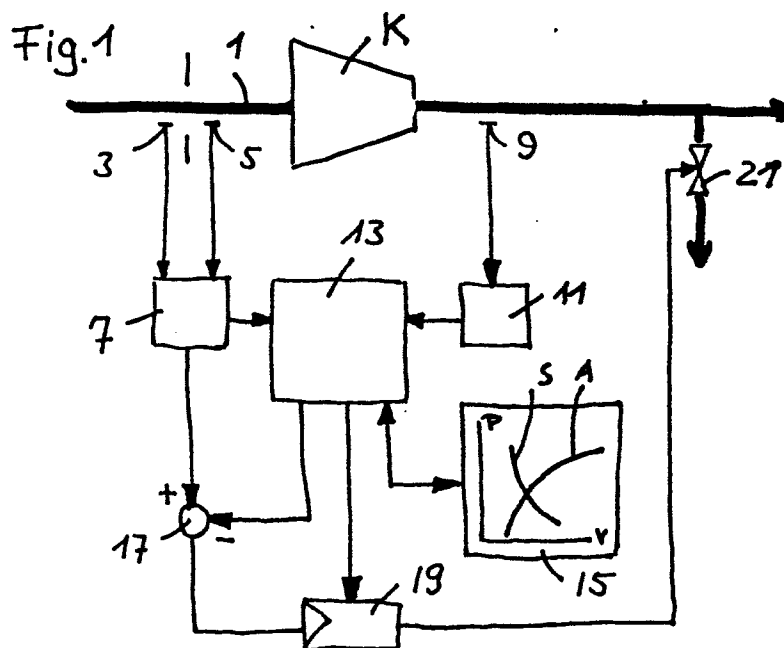
Bahnhofstrasse, 66 Postfach 11 02 40  
D-4200 Oberhausen 11(DE)

72 Erfinder: Blotenberg, Wilfried, Dipl.-Ing.  
Irkensbusch 28  
D-4220 Dinslaken(DE)

74 Vertreter: Glawe, Delfs, Moll & Partner  
Patentanwälte  
Postfach 26 01 62 Liebherrstrasse 20  
D-8000 München 26(DE)

54 Verfahren und Einrichtung zum Regeln von Turbokompressoren.

57 Bei der Pumpgrenzregelung von Turbokompressoren wird der Verstärkungsfaktor der das Regelsignal für ein Abblaseventil liefernden Reglers entsprechend der zum jeweiligen Arbeitspunkt gehörenden Steigung der Abblaselinie variiert.



EP 0 223 208 A2

## Verfahren und Einrichtung zum Regeln von Turbokompressoren

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Regeln von Turbokompressoren zum Verhindern des Pumpens, von der im Oberbegriff des Anspruchs 1 angegebenen Art, sowie eine Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens

Als Pumpen bezeichnet man bei Kompressoren das stoßweise oder periodische Rückströmen von Fördermedium von der Druck-zur Saugseite. Dieser Zustand tritt z.B. bei zu hohem Enddruck bzw. Enddruck/Saugdruck-Verhältnis und/oder zu niedrigem Durchsatz ein. Im Kennfeld kann deshalb eine Pumpgrenzlinie eindeutig definiert werden, die das Kennfeld in den stabilen und instabilen Bereich teilt. Die Pumpgrenzlinie ist in der Regel gekrümmt, d.h. sie hat in verschiedenen Bereichen des Kennfeldes unterschiedliche Steigungen. In der häufig verwendeten Kennfelddarstellung mit Durchsatz und Druck als Koordinaten z.B., verläuft die Pumpgrenzlinie bei steigendem Druck flacher. Für andere mögliche Kennfelddarstellungen mit Leitschaukelstellung, Drehzahl, Förderhöhe des Kompressors oder dgl. gilt entsprechendes.

Um Kompressoren vor dem Pumpen zu -schützen, wird in einem Sicherheitsabstand parallel zur Pumpgrenzlinie eine Abblaselinie definiert, und bei Annäherung des momentanen Arbeitspunktes an die Abblaselinie wird ein Abblaseventil mehr oder weniger geöffnet, so daß der Istwert einer Regelgröße, insbesondere des Drucksatzes, einen anhand der Abblaselinie und der Führungsgröße, insbesondere des Enddruckes, ermittelten Sollwert nicht übersteigt. Es gibt auch Regelungen, bei denen der Durchsatz als Führungsgröße zur Bildung des Sollwerts dient und der Enddruck die auf den Sollwert zu regelnde Regelgröße ist.

Der gekrümmte Verlauf der Abblaselinie hat zur Folge, daß eine vorgegebene Änderung der Führungsgröße an verschiedenen Stellen der Abblaselinie unterschiedlich große Änderungen des Sollwerts für die Regelgröße zur Folge hat. Dies wirkt sich als unterschiedlich starke Verstärkung im Regelkreis aus.

Pumpgrenzregler sind Sicherheitsregler und werden in der Regel so aktiviert, daß sie nahe der Stabilitätsgrenze arbeiten, um einen bestmöglichen Kompressorschutz zu gewährleisten. Die Lage der Stabilitätsgrenze wird sehr stark von der Gesamtverstärkung des Regelkreises beeinflusst. Eine hohe Gesamtverstärkung führt am ehesten zu Instabilität.

Der Verstärkungsfaktor des eigentlichen Reglers wird deshalb so eingestellt, daß er zusammen mit der sich aus der Steigung der Abblaselinie ergebenden Verstärkung noch zu einer innerhalb der Stabilitätsgrenze liegenden Gesamtverstärkung führt. Hierbei ist selbstverständlich auf den Bereich

der Abblaselinie abzustellen, in welchem die höchste Verstärkung wirksam ist. In anderen Bereichen der Abblaselinie, zu denen auch die häufigsten Arbeitsbereiche gehören können, ist der Regelkreis dann nicht optimal justiert. Der stark gekrümmte Verlauf der Abblaselinie hat deshalb zur Folge, daß ein Pumpgrenzregler mit festeingestellten Regelparametern in weiten Arbeitsbereichen nicht optimal justiert ist.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren der eingangs genannten Art und eine Einrichtung zu seiner Durchführung zu schaffen, mit dem eine Anpassung des Regelverhaltens an die Erfordernisse in den verschiedenen Bereichen des Kennfeldes möglich ist.

Die Lösung der Aufgabe ist im Anspruch 1 angegeben. Die Unteransprüche beziehen sich auf vorteilhafte weitere Ausgestaltungen.

Die Erfindung beruht auf dem Grundgedanken, die Auswirkungen der sich entsprechend der Führungsgröße ändernden Steigung der gekrümmten Abblaselinie auf die Gesamtverstärkung des Regelkreises durch eine entsprechend gegenläufige Änderung des Verstärkungsfaktors des Reglers auszugleichen, so daß sich im gesamten Arbeitsbereich eine weitgehend konstante Gesamtverstärkung des Regelkreises ergibt. Dieses Grundprinzip kann aber auch durch Umschaltung zwischen zwei oder wenigen unterschiedlichen Werten des Verstärkungsfaktors des Reglers approximiert werden.

Ausführungsformen der Erfindung werden im folgenden anhand der Zeichnungen näher erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 ein vereinfachtes Schema einer Einrichtung zur Regelung eines Turbokompressors zum Verhindern des Pumpens;

Fig. 2 schematisch den Verlauf der pumpgrenzlinie und Abblaselinie im Kennfeld des Kompressors;

Fig. 3 eine Teil einer vereinfachten Ausführungsform der Regeleinrichtung;

Fig. 4 ein Detail einer weiteren Ausführungsform der Regeleinrichtung.

Gemäß Fig. 1 wird im Saugstutzen 1 eines Kompressors K durch Meßfühler 3,5 der Druck vor und hinter einer Drosselblende gemessen, woraus ein Meßumformer 7 den Istwert für den saugseitigen Kompressordurchsatz V bildet. Am Kompressoraustrag erfaßt ein Meßfühler 9 den Istwert des Enddruckes P, der über einen Meßumformer 11 in einen Rechner 13 eingegeben wird. Der Rechner 13 ist mit einem Speicher 15 verbunden, in welchem der Verlauf der Abblaselinie A in dem durch P und V gegebenen Kompressorkennfeld abge-

speichert ist. Aus dem Istwert von P und der Abblaselinie ermittelt der Rechner 13 einen Sollwert für den Durchsatz V. Ist- und Sollwert werden in einem Differenzglied 17 verglichen und die Differenz als Eingangssignal einem Regler 19 zugeführt, der ein Proportional-Integral- und/oder Differentialverhalten aufweisen kann und dessen Ausgangesignal eine Stellgröße für ein vom Kompressoraustritt abzweigendes Abblaseventil 21 oder ein zum Saugstutzen zurückführendes Umlaseventil liefert.

Wie in Fig. 2 dargestellt, verläuft im Kompressorkennfeld, welches durch den Durchsatz V als Abszisse und den Enddruck P (oder auch das Enddruck/Saugdruck-Verhältnis) als Ordinate gegeben ist, die Pumpgrenzlinie PG und die in einem Sicherheitsabstand rechts davon verlaufende Abblaselinie A jeweils gekrümmt. Dies hat zur Folge, daß eine bestimmte Änderung  $\Delta P$  des als Führungsgröße dienenden Enddrucks unterschiedlich großen Änderungen  $\Delta V$  bzw.  $\Delta V'$  des Sollwertes für den Durchsatz entsprechen. Da der als Sollwertgeber dienende Speicher 15 mit dem Rechner 13 Teil des Regelkreises ist, wirken sich diese Unterschiede als Änderungen in der Gesamtverstärkung des Regelkreises aus, falls der Regler 19 einen konstanten Verstärkungsfaktor hat. In Fig. 2 entspricht der steile untere Verlauf der Abblaselinie A einer kleinen Verstärkung und der flache obere Verlauf einer hohen Verstärkung. Wird dagegen, was ebenfalls bekannt ist, die Rolle von Führungs- und Regelgröße vertauscht und der Durchsatz V als Führungsgröße zur Bestimmung eines Sollwertes des Enddrucks P verwendet, dann kehren sich die Verhältnisse um und die Verstärkung ist im steilen Teil der Abblaselinie groß und im flachen Teil klein.

Die Gesamtverstärkung des Regelkreises ist die Summe der sich aus der Steigung der Abblaselinie ergebenden Verstärkung und dem Verstärkungsfaktor des Reglers 19 plus der sogenannten Streckenverstärkung, d.h. den durch die Regelstrecke, insbesondere dem Kompressor und dem Abblaseventil vorgegebenen Verstärkungsfaktoren. Um eine möglichst in allen Bereichen konstante Verstärkung zu erzielen, wird deshalb erfindungsgemäß der Verstärkungsfaktor im Regler 19 geändert. Bei der Ausführungsform nach Fig. 1 ist im Speicher 15 außer dem Verlauf der Abblaselinie A auch der Verlauf der Steigung S der Abblaselinie A als Funktion vorgegeben. Der Rechner 13 ermittelt für jeden Istwert der Führungsgröße P den zugehörigen Wert der Steigung der Abblaselinie und erzeugt ein entsprechendes Steuersignal, welches einem Steuereingang des Reglers 19 zugeführt und dort eine entsprechende Änderung des Verstärkungsfaktors des Reglers 19 bewirkt.

Anstatt den jeweiligen Wert der Steigung der Abblaselinie A aus dem Speicher 15 abzurufen, kann der Rechner 13 auch aus den zu verschiedenen Werten von P gehörenden Werten der Abblaselinie A deren Steigung ausrechnen.

Bei der vereinfachten Ausführungsform nach Fig. 3 wird der Istwert von P nicht einem Rechner, sondern einem einfachen Funktionsgeber 23 zugeführt, welcher jedem Istwert von P einen Sollwert für V entsprechend einem vorgegebenen, der Abblaselinie entsprechenden Zusammenhang fest zuordnet. Außerdem wird der Istwert von P einem zweiten Funktionsgeber 25 zugeführt, welcher jedem Istwert von P einen entsprechenden Wert für die Steigung der Abblaselinie fest zuordnet, der dann als Steuersignal dem Regler 19 zum Steuern des Verstärkungsfaktors zugeführt wird.

Bei der Ausführungsform nach Fig. 4 wird der Istwert von P ebenfalls dem Funktionsgeber 23 und außerdem einem Komparator 27 zugeführt, der den Istwert von P mit vorgegebenen oberen und unteren Grenzwerten  $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$  vergleicht. Solange sich der Istwert von P innerhalb dieser Grenze befindet, bleibt der Verstärkungsfaktor des Reglers 19 unverändert. Bei Überschreiten von  $P_{\max}$  oder Unterschreiten von  $P_{\min}$  wird der Verstärkungsfaktor des Reglers 19 um einen fest vorgegebenen Wert erhöht bzw. erniedrigt. Dies entspricht einer Approximation des gekrümmten Verlaufes der Abblaselinie durch drei Geradenabschnitte mit unterschiedlicher Steigung, wobei der mittlere Geradenabschnitt zwischen den Grenzwerten  $P_{\min}$ ,  $P_{\max}$  verläuft. Bei einer noch einfacheren Ausführungsform, die einer Approximation der Abblaselinie durch nur zwei Geradenabschnitte entspricht, wird je nach Über- oder Unterschreiten eines einzigen Grenzwertes der Verstärkungsfaktor zwischen zwei Werten umgesteuert.

Auch bei der Ausführungsform nach Fig. 1 ist es möglich, den gekrümmten Verlauf der Abblaselinie bzw. ihrer Steigung durch Geradenabschnitte anzunähern, wobei im Speicher 15 lediglich die Koordinaten der Knickpunkte der Geradenabschnitte festgelegt zu sein brauchen, aus denen dann der Rechner 13 den Verlauf des Geradenabschnittes bzw. seine Steigung ermitteln kann. Auch kann die Abblaselinie im Speicher 15 nicht durch eine Wertetabelle, sondern durch eine mathematische Funktion vorgegeben sein. Entsprechend kann bei der Ausführungsform nach Fig. 3 im Funktionsgeber 25 ein durch zwei oder mehr Geradenabschnitte approximierter Verlauf der Abblaselinie vorgegeben sein.

Selbstverständlich ist die beschriebene Funktionsweise nicht an die gewählte Kennfelddarstellung mit den Koordinaten Enddruck und Volumenstrom gebunden, sondern ist sinngemäß auch an jede andere, dem Fachmann geläufige Kennfelddarstellung anpaßbar.

## Ansprüche

1. Verfahren zum Regeln eines Turbokompessors zum Verhindern des Pumpens, bei dem die Istwerte einer Führungsgröße, insbesondere des Enddruckes, und einer Regelgröße, insbesondere des Durchsatzes, die zusammen die Lage des Arbeitspunktes im Kompressorkennfeld definieren, laufend erfaßt werden, aus der Führungsgröße und einer im Kennfeld vorgegebenen Abblaselinie ein Sollwert für die Regelgröße gebildet wird, und anhand von Soll- und Istwert der Regelgröße über einen Regler ein Stellsignal für Abblasventil erzeugt wird, dadurch **gekennzeichnet**, daß der Verstärkungsfaktor des Reglers in Abhängigkeit vom Istwert der Führungsgröße derart verändert wird, daß der Einfluß der in Abhängigkeit von der Führungsgröße unterschiedlichen Steigung der Abblaselinie auf die Gesamtverstärkung des Regelkreises mindestens annähernd kompensiert wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch **gekennzeichnet**, daß der Verstärkungsfaktor des Reglers mindestens annähernd umgekehrt proportional zu dem zum jeweiligen Istwert der Führungsgröße gehörenden Wert der Steigung der Abblaselinie gesteuert wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch **gekennzeichnet**, daß bei Approximation der Abblaselinie durch Geradenabschnitte der Verstärkungsfaktor des Reglers zwischen ver-

schiedenen diskreten Werten umgeschaltet wird, wenn der Istwert der Führungsgröße vorgegebene Grenzwerte über- oder unterschreitet.

4. Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 3, mit Meßfühlern für Führungs- und Regelgröße, einem von der Führungsgröße beaufschlagten, vorgegebene Daten für die Abblaselinie enthaltenden Funktionsgeber zur Erzeugung des Sollwertes der Regelgröße, einem mit Ist- und Sollwert der Regelgröße beaufschlagten Differenzglied, einem von dessen Ausgangssignal beaufschlagten Regler und einem vom Regler gesteuerten Abblaseventil, dadurch **gekennzeichnet**, daß der Regler (19) einen Steuereingang zum Verändern seines Verstärkungsfaktors aufweist und daß der Meßfühler - (9) für die Führungsgröße an einen Signalgeber - (13,25,27) mit vorgegebenen, der Steigung der Abblaselinie zugeordneten Daten angeschlossen ist, und daß der Ausgang des Signalgebers (13,25,27) mit dem Steuereingang des Reglers (19) verbunden ist.

5. Einrichtung nach Anspruch 4, dadurch **gekennzeichnet**, daß in dem Signalgeber (13,15) eine die Steigung der Abblaselinie in Abhängigkeit von der Führungsgröße wiedergebende Wertefolge vorgegeben ist.

6. Einrichtung nach Anspruch 4, dadurch **gekennzeichnet**, daß im Signalgeber (27) Grenzwerte  $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$  für die Führungsgröße vorgegeben sind und daß der Signalgeber (27) Umschaltssignale zum stufenweisen Ändern des Verstärkungsfaktors des Reglers (19) bei Unterschreiten bzw. Überschreiten der Grenzwerte erzeugt.

7. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch **gekennzeichnet**, daß der Verstärkungsfaktor des Reglers durch wahlweises Aufschalten eines dem Reglereingang vorgeschalteten Verstärkers steuerbar ist und das Ausgangssignal des Signalgebers das Aufschalten des Verstärkers steuert.

45

50

55

