

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 1 340 919 A2

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:

03.09.2003 Patentblatt 2003/36(51) Int Cl.7: **F04D 27/02**(21) Anmeldenummer: **03000483.2**(22) Anmeldetag: **11.01.2003**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

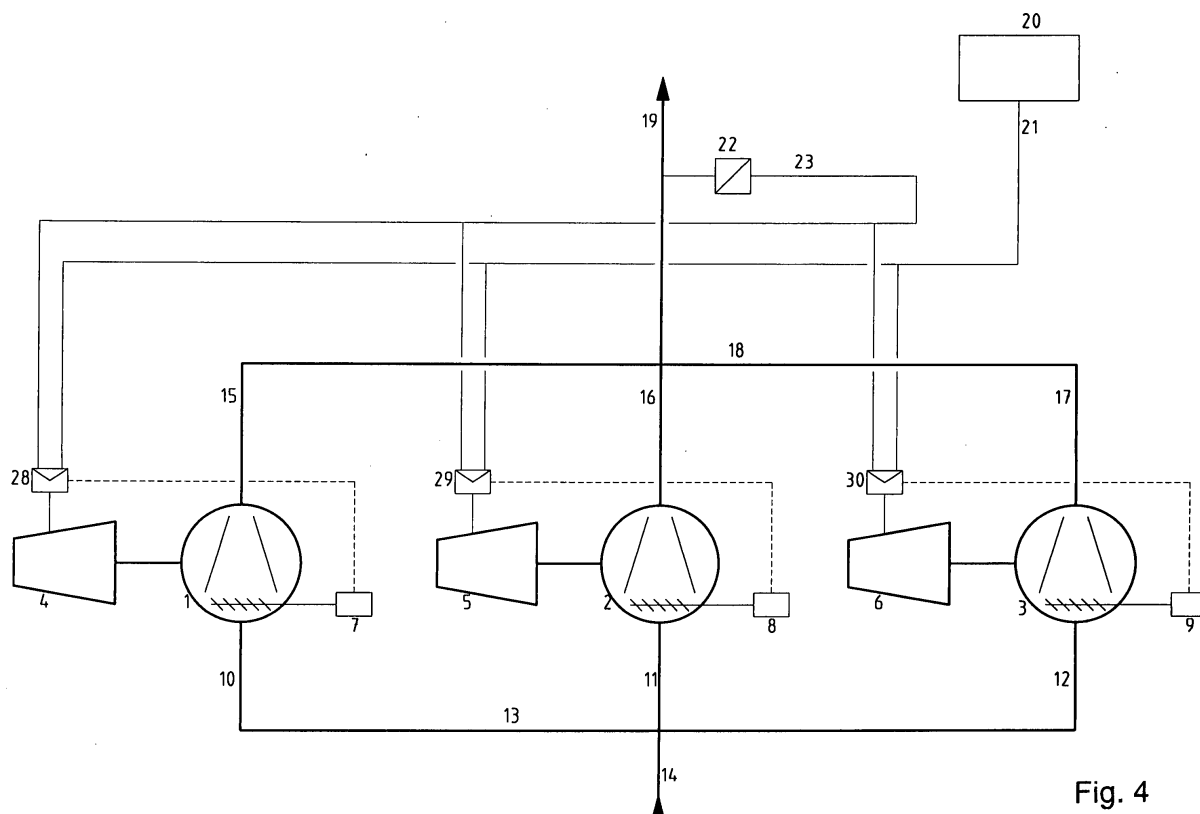
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HU IE IT LI LU MC NL PT SE SI SK TR**

Benannte Erstreckungsstaaten:

AL LT LV MK RO(30) Priorität: **28.02.2002 DE 10208676**(71) Anmelder: **MAN Turbomaschinen AG
46145 Oberhausen (DE)**(72) Erfinder: **Blotenberg, Wilfried, Dr.
46535 Dinslaken (DE)**(74) Vertreter: **Radünz, Ingo, Dipl.-Ing.
Schumannstrasse 100
40237 Düsseldorf (DE)****(54) Verfahren zum Regeln von mehreren Strömungsmaschinen im Parallel-oder Reihenbetrieb**

(57) In einer Station wirken mehreren Strömungsmaschinen (1,2,3) zusammen, wobei jede Strömungsmaschine mit der sie antreibenden Antriebsmaschine (4,5,6) eine Maschineneinheit bildet, der ein Maschinenregler (28,29,30) zugeordnet ist. Zum Regeln dieser Strömungsmaschinen (1,2,3) im Parallel- oder Reihenbetrieb zur Einhaltung mindestens einer von der Station

vorgegebenen und allen Strömungsmaschinen (1,2,3) gemeinsamen Prozessgröße, wird die vorgegebene, gemeinsame Prozessgröße direkt auf jeden der Maschinenregler (28,29,30) aufgegeben und diese vorgegebene, gemeinsame Prozessgröße wird ausschließlich über die der jeweiligen Maschineneinheit zugeordneten Maschinenregler (28,29,30) ausgeregelt.

**Fig. 4****EP 1 340 919 A2**

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Regeln von mehreren in einer Station zusammenwirkenden Strömungsmaschinen im Parallel- oder Reihenbetrieb zur Einhaltung mindestens einer von der Station vorgegebenen und

allen Strömungsmaschinen gemeinsamen Prozessgröße mit den Merkmalen des Oberbegriffes des Anspruches 1.

[0002] In der EP-B-0 132 487 ist ein Verfahren zum Betreiben von mehreren parallel geschalteten Turbokompressoren beschrieben, die jeweils zur Verhinderung des Pumpens mit einer Pumpgrenzregelung versehen sind. Die Turbokompressoren werden gemeinsam von Lastverteilungsreglern und einzeln von je einem Druckregler gesteuert. Die Lastverteilungsregler regeln die Einstellung der Kompressoren untereinander derart, dass bei allen Kompressoren gleiche Abstände des Betriebspunktes gegenüber der Abblaselinie vorliegen. Dabei wird nur einer der Kompressoren von seinem Druckregler gesteuert, während die übrigen über die Lastverteilungsregelung nachgeführt werden.

[0003] Aus der EP-B-0 431 287 ist ein Verfahren zum optimierten Betreiben mehrerer Kompressoren im Parallel- oder Reihenbetrieb bekannt. Dabei wird für einen beliebigen Arbeitspunkt unter Anwendung von Algorithmen stets die Kombination von Maschinenparameter ermittelt, in der die Gesamtleistungsaufnahme aller Antriebsmaschinen minimal wird. Bei diesem Verfahren wird ein übergeordneter Masterregler verwendet.

[0004] Nach dem bisher üblichen Stand der Technik muss bei einer Reihen- oder Parallelschaltung von Strömungsmaschinen mit individuellen Regelorganen und individuellen Reglern stets ein übergeordneter Masterregler, auch Führungsregler genannt, erforderlich sein. Der Masterregler hat eine übergeordnete Aufgabe. Er ermittelt aus der geforderten Gesamtkapazität (gewünschter Druck oder gewünschter Durchfluss aller Kompressoren) die erforderlichen Stellbefehle für die individuellen Maschineneinheiten. Insbesondere bei unsymmetrisch aufgebauten Anlagen errechnet der Masterregler unterschiedliche Stellgrößen für die individuellen Maschinenregler. Nach dem einschlägigen Stand der Technik wird immer wieder betont, dass es für die Lastverteilung der Last auf verschiedene Kompressoren nur einen Regler geben darf, der nur einen Sollwert und nur einen Istwert als Messgröße verarbeitet, da es ansonsten zu Konflikten in den nachgeschalteten Maschinenreglern kommen kann. Jede Maschineneinheit benötigt eine eindeutige Stellgröße, die derart auf die anderen Stellgrößen abgestimmt ist, dass es zu keinen Widersprüchen kommen kann. Bei Durchflussregelungen darf der Durchfluss nur an einer einzigen Stelle gemessen werden. Bei einer Druckregelung darf der Druck ebenfalls nur an einer einzigen Stelle gemessen werden. Es darf auch nur einen einzigen Sollwert für den gemeinsamen Druck- oder Durchflussregler geben. Die Beachtung dieser Regel ist insbesondere bei Verwendung als Druckregler für den Enddruck oder den Saugdruck besonders wichtig. Wäre jede Maschineneinheit mit einem eigenen Druckregler ausgerüstet, und würden Drucksollwert und Druckistwert zwischen den verschiedenen Reglern auch nur geringfügig voneinander abweichen, was allein schon durch die Analog/Digitalwandlung der Eingangssignale erfolgen kann, würden die Regler der Parallelkompressoren derart gegeneinander arbeiten, dass der eine Regler die Maschine herunterfährt und der andere herauffährt. Die Maschinenregler mit ihren nachgeschalteten Maschinen arbeiten so lange gegeneinander, bis eine der beiden Maschinen die obere oder die untere Leistungsgrenze erreicht hat. Darüber hinaus ist der Masterregler ein aufwendiges Bauteil, dessen Ausfall zu einem Stillstand der gesamten Anlage führt.

[0005] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die gattungsgemäße Regelung zu vereinfachen, die Verfügbarkeit der einzelnen Regler zu erhöhen und kollidierende Wechselwirkungen der Regler aufeinander zu vermeiden.

[0006] Die Aufgabe wird bei einem gattungsgemäßen Verfahren erfindungsgemäß durch die kennzeichnenden Merkmale des Anspruches 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

[0007] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird auf einen alle Strömungsmaschinen beeinflussenden Masterregler zur Regelung der Prozessgröße verzichtet, indem die Funktionität dieses Prozessgrößenreglers aufgeteilt wird auf die einzelnen Maschinenregler. Der Algorithmus für die Aufteilung der Last auf die einzelnen Kompressoren, der nach dem bekannten Stand der Technik ausschliesslich im Masterregler abläuft, ist erfindungsgemäß in jedem einzelnen Maschinenregler realisiert. Als Prozessgröße können einzeln oder in Kombination der Durchfluss, der Enddruck, der Saugdruck, das Druckverhältnis, die Temperatur, das Niveau in einem Behälter, die Leistung der Antriebsmaschine oder die Lastverteilung der Kompressoren herangezogen werden. Da Speicherplatz und Rechenleistung bei moderner Hardware in ausreichendem Maße vorhanden sind, gibt es von dieser Seite her keine Einschränkungen. Durch den Wegfall des übergeordneten Masterreglers kann eine bestehende Station problemlos durch weitere Maschineneinheiten erweitert werden. Es ist lediglich eine Maschineneinheit mit einem Maschinenregler hinzufügen, der die gleiche Steuerung und Regelung enthält wie jede der vorhandenen Maschineneinheiten. Durch die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens entstehen keine Investitions-, Betriebs- oder Wartungskosten für einen Masterregler. Ebenso wenig kann es zu Betriebsstörungen in der Station durch einen Ausfall des Masterreglers kommen. Da keine über- und untergeordneten Regler vorhanden sind, entfallen kollidierende Wechselwirkungen verschiedener Regler aufeinander. Das erfindungsgemäße Verfahren ist anwendbar auf den Parallelbetrieb, den Reihenbetrieb und den kombinierten Parallel- und Reihenbetrieb der Strömungsmaschinen in einer Station. Weitere Vorteile der Erfindung werden im Zusammenhang mit nachfolgend Beschreibung von in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispielen der Erfindung und des Standes der Technik genannt.

[0008] Mehrere Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in der Zeichnung dargestellt und werden im Folgenden näher erläutert. Es zeigen

- Fig. 1 ein Regelsystem für Kompressoren im Parallelbetrieb gemäß dem Stand der Technik,
- 5 Fig. 2 ein Regelsystem für Kompressoren im Reihenbetrieb gemäß dem Stand der Technik,
- Fig. 3 ein Signalflussdiagramm für das Regelsystem nach Fig. 1 oder 2,
- Fig. 4 ein Regelsystem für Kompressoren im Parallelbetrieb gemäß der Erfindung,
- Fig. 5 ein Regelsystem für Kompressoren im Reihenbetrieb gemäß der Erfindung,
- Fig. 6 ein System zur Pumpgrenzregelung gemäß dem Stand der Technik,
- 10 Fig. 7 ein Signalflussdiagramm für das Regelsystem nach Fig. 4 oder 5,
- Fig. 8 ein Regelsystem für Kompressoren im Parallelbetrieb gemäß einer anderen Ausführungsform der Erfindung,
- Fig. 9 ein Regelsystem für Kompressoren im Parallel- und Reihenbetrieb,
- Fig. 10 ein Regelsystem für Kompressoren im Parallel- und Reihenbetrieb, wobei die Regelung eines der Kompressoren aufgeblendet ist und
- 15 Fig. 11 ein Regelsystem für Kompressoren im Parallel- und Reihenbetrieb, wobei die Regelung eines der Kompressoren aufgeblendet ist, gemäß einer anderen Ausführungsform der Erfindung.

[0009] Die Fig. 1 zeigt drei Kompressoren 1, 2, 3 im Parallelbetrieb, die jeweils durch eine als Antriebsmaschine dienende Turbine 4, 5, 6 angetrieben werden. Jeweils ein Kompressor bildet mit einer Antriebsmaschine eine Maschineneinheit. Die drei Maschineneinheiten sind zu einer Station zusammengefasst, die ihrerseits Teil eines Pipelinesystems sein kann oder in einen Prozess eingebunden ist. Durch Variation der Turbinendrehzahl kann die Förderkapazität des Kompressors 1, 2, 3 variiert werden. Alternativ können die Turbinen auch durch Motoren mit fester Drehzahl ersetzt werden, wobei in diesem Anwendungsfall verstellbare Leitschaufeln mit den Stellantrieben 7, 8, 9 in den Kompressoren 1, 2, 3 oder Drosselklappen vor den Kompressoren (nicht gezeigt) verwendet werden.

[0010] Die Kompressoren 1, 2, 3 sind durch Eintrittsleitungen 10, 11, 12 mit einer saugseitigen Sammelschiene 13 verbunden, die ihrerseits Verbindung zu einem saugseitigen Prozess 14 oder zu einer Pipeline bzw. zu einem Gasspeicher hat. Druckseitig sind die Kompressoren 1, 2, 3 über Austrittsleitungen 15, 16, 17 mit einer druckseitigen Sammelschiene 18 verbunden, die ihrerseits Verbindung zu einem druckseitigen Prozess 19 oder zu einer Pipeline bzw. zu einem Gasspeicher hat.

[0011] Überlagert über der ganzen Station ist eine Stationsleitebene, die als Sollwertvorgabe 20 die Sollwerte für den Betrieb der Station vorgibt. Die tatsächliche Kapazität der Maschinenanlage, üblicherweise der Enddruck oder der Saugdruck der Kompressoranlage oder der Durchfluss wird mit einem Sensor 22 gemessen und über eine Signalleitung 23 einem Masterregler 24 als Istwert übermittelt. Der Prozessgrößensollwert für die gesamte Station wird von der Sollwertvorgabe 20 über eine Signalleitung 21 an den Masterregler 24 gegeben, der nach einem vorgegebenen Algorithmus die erforderliche Belastung der einzelnen Maschineneinheiten errechnet und über die Signalleitungen 25, 26 und 27 den jeweiligen Maschinenreglern 28, 29, 30 den Sollwert für die Drehzahl oder die Position der Leitschaufeln oder die Drosselarmatur vorgibt. Die Maschinenregler 28, 29, 30 stellen nun ihrerseits die Drehzahl der Turbinen 4, 5, 6 bzw. die Stellung der Drosselklappen bzw. Saugdrosseln auf diesen Sollwert ein.

[0012] Der Masterregler 24 hat eine übergeordnete Aufgabe. Er ermittelt aus der geforderten Gesamtkapazität (gewünschter Druck oder gewünschter Durchfluss) aller drei Kompressoren 1, 2, 3 die erforderlichen Stellbefehle für die individuellen Maschineneinheiten. Insbesondere bei unsymmetrisch aufgebauten Anlagen errechnet der Masterregler 24 unterschiedliche Stellgrößen für die individuellen Maschinenregler 28, 29, 30.

[0013] Fig. 2 zeigt den Anwendungsfall für drei Kompressoren 1, 2, 3 im Reihenbetrieb. Der Aufbau dieser Station entspricht weitgehend dem der in Fig. 1 dargestellten Station für den Parallelbetrieb. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass der erste Kompressor 1 mit der Eintrittsleitung 11 und über die Austrittsleitung 15 mit dem zweiten Kompressor 2 verbunden ist, und dieser ist über die Austrittsleitung 16 und die Eintrittsleitung 12 mit dem dritten Kompressor 3 verbunden. Die saugseitige Sammelschiene 13 gibt es nicht, der Prozess 14 ist direkt mit der als Saugleitung dienenden Eintrittsleitung 10 verbunden. Ebenso fehlt die druckseitige Sammelschiene, vielmehr ist der Austritt des dritten Kompressors 3 über die Austrittsleitung 17 direkt mit dem Prozess 19 verbunden.

[0014] Für die Regelung von Kompressoren im Reihenbetrieb gelten nach dem bekannten Stand der Technik genau die gleichen Aussagen wie für den Parallelbetrieb. Sollen die Kompressoren 1, 2, 3 im Reihenbetrieb auf konstanten Durchfluss gefahren werden, ermittelt der Masterregler 24, auf welche Drehzahlen die einzelnen Maschineneinheiten zu fahren sind, damit der gewünschte Durchfluss erreicht wird. Werden die Kompressoren 1, 2, 3 auf konstanten Enddruck bzw. auf konstantes Druckverhältnis gefahren, ermittelt der Masterregler 24, welches Druckverhältnis jeder einzelne Kompressor 1, 2, 3 zu erbringen hat, um das geforderte Gesamtdruckverhältnis zu erreichen. Auch für den Reihenbetrieb gilt nach dem allgemeinen Stand der Technik, dass es nur einen Masteregler geben darf, der nur einen Sollwert und einen Istwert erhält.

[0015] Die Fig. 3 zeigt ein Signalflussdiagramm für ein Regelsystem für eine Station mit drei Kompressoren 1, 2, 3.

Die Stationssollwert (Durchflusssollwert oder Drucksollwert) wird über die Signalleitung 21 und einen Wandler 31 auf eine Soll/Ist-Vergleichsstelle 32 gegeben. Der Istwert (gemessener Durchfluss oder Druck) gelangt über die Signalleitung 23 und einen Wandler 33 zu der gleichen Vergleichsstelle 32. In dieser Vergleichsstelle 32 wird die Differenz aus Sollwert und Istwert gebildet und an einen Stationsregler 34 gegeben. Der Stationsregler 34 verstellt seine Ausgangsgröße so lange, bis der Istwert dem Sollwert entspricht. Der Ausgang des Stationsreglers 34 wird über Anteilsteller 35, 36, 37 und Wandler 38, 39 und 40 den Signalleitungen 25, 26, 27 zugeleitet. Diese Signalleitungen 25, 26, 27 verbinden den Stationsregler 34 mit den drei Einheitenreglern 41, 42, 43. Jeder Einheitenregler 41, 42, 43 besitzt einen Wandler 44, 45 und 46 für die Eingangsgröße und einen weiteren Eingangswandler (nicht dargestellt) für den Maschinenistwert, typischerweise die Drehzahl der Antriebsturbine 4, 5, 6 oder die Position der Eintrittsleitschaufeln bei leitschaufelgeregelten Kompressoren. In den Vergleichern 47, 48 und 49 wird die Differenz zwischen Maschinenistwert und Maschinensollwert gebildet und dem jeweiligen Einheitenregler 41, 42 und 43 zugeführt. Diese verstellen nun ihrerseits über Wandler 50 51 52 die Drehzahl der Turbine 4, 5, 6 (oder die Stellung der Leitschaufeln) derart, dass der Maschinenistwert genau dem Maschinensollwert entspricht.

[0016] In den Anteilstellern 38, 39 und 40 wird die Stellgröße des Stationsregler 34 auf die einzelnen Maschineneinheiten aufgeteilt. Das Verstellgesetz kann je nach Anlagenerfordernis linear oder nichtlinear sein. Es kann bei Bedarf von verschiedenen Parametern abhängig sein. Es soll vereinfachend ein lineares Verstellgesetz angenommen werden, nach dem die Turbinen 4 und 6 jeweils 30% der Gesamtleistung und die Turbine 5 40 % der Gesamtleistung aufzubringen haben. In den Anteilstellern 35 und 37 ist demzufolge ein Faktor 0,3 eingestellt, im Anteilsteller 36 ist ein Faktor 0,4 eingestellt. Sollte nun der Stationsregler 34 10 % mehr Leistung verlangen und sein Ausgang deshalb um 10% ansteigen, steigt der Maschinensollwert, der der Turbine 4 über die Signalleitung 25 zugeführt wird, um 3%, der Maschinensollwert von Turbine 5 um 4% und der Maschinensollwert von Turbine 6 um 3%.

[0017] Gemäß Fig. 3 gehören die Elemente 31 bis 40 zu dem gemeinsamen Masterregler 24, die Komponenten 44, 47, 41 und 50 gehören zu dem Maschinenregler 28 der Turbine 4 mit dem Kompressor 1, die Komponenten 45 48, 42 und 51 gehören zu dem Maschinenregler 29 der Turbine 5 mit dem Kompressor 2 und die Komponenten 46, 49, 43 und 52 gehören zu dem Maschinenregler 30 der Turbine 6 mit dem Kompressor 3.

[0018] In vielen Anwendungen ist es üblich, dass der Maschinenregler eine weitere Regelfunktion enthält. So kann z. B. ein Druckregelkreis derart aufgebaut sein, dass dem Master-Druckregler Durchflussregler unterlagert sind, die den jeweiligen Durchfluss durch die einzelnen Maschinen regeln. Diesen Durchflussreglern sind nochmals Drehzahlregler unterlagert, die dann die Drehzahl regeln. In diesen Anwendungsfällen ist der den Maschinen zugeordnete Durchflussregler Teil des jeweiligen Einheitenreglers 41, 42 43.

[0019] Jeder Turbokompressor benötigt eine Pumpgrenzregelung, die Teil einer jeden Maschinenregelung ist und deren Aufgabe es ist, den Kompressor vor einem Betrieb im instabilen Arbeitsbereich zu schützen. Der Betrieb im instabilen Arbeitsbereich wird Kompressorumpfen genannt. Fig. 6 zeigt ein Blockschaltbild einer typischen Pumpgrenzregelung für einen Kompressor mit variablem Saugdruck. Ein Kompressor 53 ist mit einer Saugleitung 54 und einer Druckleitung 55 ausgerüstet. Ein Umblaseventil 56 in einer Umblaseleitung 57 kann bei Bedarf geregelt geöffnet werden und damit den Durchfluss durch den Kompressor erhöhen, wenn die Gasabnahme durch den Prozess kleiner ist als der minimal zulässige Kompressordurchfluss. Ein Umblaseventil 56, auch Pumpgrenzregelventil genannt, wird über eine Steuerleitung 58 vom Pumpgrenzregler 59 angesteuert, dessen Eingangsgrößen der mit dem Sensor 60 gemessene Eintrittsdruck, der mit dem Sensor 61 gemessene Eintrittsdurchfluss, der mit dem Sensor 62 gemessene Enddruck und die mit dem Sensor 63 gemessenen Eintrittstemperatur ist. Da der Pumpgrenzregler 59 üblicherweise innerhalb der gleichen Reglerhardware realisiert ist wie der Maschinenregler (er ist ein wesentlicher Teil des Maschinenreglers), stehen Signale wie Kompressordurchfluss sowie Druck vor und hinter dem Kompressor innerhalb des Maschinenreglers zur Verfügung und können damit auch für den Lastverteilungsregler und den Kapazitätsregler verwendet werden.

[0020] In den Fig. 4 und 5 ist das erfindungsgemäße Regelverfahren für drei zu einer Station zusammengefasste Kompressoren 1, 2, 3 im Parallelbetrieb und im Reihenbetrieb dargestellt. Wie im Zusammenhang mit den Fig. 1 und 2 bereits beschrieben, sind die Kompressoren 1, 2, 3 mit Turbinen 4, 5, 6 als Antriebsmaschinen gekoppelt und werden von diesen angetrieben. Durch Variation der Turbinendrehzahl kann die Förderkapazität des Kompressors 1, 2, 3 variiert werden. Alternativ können die Antriebsturbinen auch durch Motoren mit fester Drehzahl ersetzt werden, wobei in diesem Anwendungsfall verstellbare Leitschaufeln mit den Stellantrieben 7, 8, 9 in den Kompressoren 1, 2, 3 oder Drosselklappen vor den Kompressoren (nicht gezeigt) verwendet werden.

[0021] Die in Fig. 4 gezeigten Kompressoren 1, 2, 3 sind durch die Eintrittsleitungen 10, 11, 12 mit der saugseitigen Sammelschiene 13 verbunden, die ihrerseits Verbindung zu dem saugseitigen Prozess 14 oder zu einer Pipeline bzw. zu einem Gasspeicher hat. Druckseitig sind die Kompressoren 1, 2, 3 über die Austrittsleitungen 15, 16, 17 mit der druckseitigen Sammelschiene 18 verbunden, die ihrerseits Verbindung zu einem druckseitigen Prozess 19 oder zu einer Pipeline bzw. zu einem Gasspeicher hat. Gemäß Fig. 5 ist der erste Kompressor 1 der in Reihe geschalteten Kompressoren 1, 2, 3 mit der Eintrittsleitung 11 und über die Austrittsleitung 15 mit dem zweiten Kompressor 2 verbunden. Dieser ist über die Austrittsleitung 16 und die Eintrittsleitung 12 mit dem dritten Kompressor 3 verbunden.

Der Prozess 14 ist direkt mit der Saugleitung 10 und der Austritt des dritten Kompressors 3 ist über die Austrittsleitung 17 direkt mit dem Prozess 19 verbunden.

[0022] Bei dem erfindungsgemäßen Regelverfahren entfällt der Masterregler. Stattdessen erhält jeder der Maschinenregler 28, 29, 30 den Gesamtsollwert von der Sollwertvorgabe 20 der Station direkt über die Signalleitung 21 zugeführt. Der Istwert wird über die Signalleitung 23 ebenfalls direkt jedem Maschinenregler 28, 29, 30 zugeführt, so dass jeder Maschinenregler 28, 29, 30 für sich die erforderlichen Berechnungen durchführen und die nachgeschalteten Stellorgane genauso verstellen kann als würde ein gemeinsamer überlagerter Masterregler eingesetzt.

[0023] Die Fig. 7 zeigt das Signalflussdiagramm für eine Parallel- oder Reihenschaltung von drei Kompressoren 1, 2, 3 gemäß Erfindung. Der Stationssollwert der Sollwertvorgabe 20 wird aufgeteilt, parallel drei Wandlern 64, 65, 66 aufgeschaltet und an die Vergleicher 70, 71, 72 weitergeleitet. Der Istwert aus der Signalleitung 23 wird drei Wandlern 67, 68, 69 aufgeschaltet und an die Vergleichen 70, 71, 72 weitergeleitet. In den Anteilstellern 35, 36 und 37, die zwischen den Wandlern 64, 65, 66 angeordnet sind, wird der Sollwert auf die einzelnen Maschineneinheiten, bestehend aus den Kompressoren 1, 2, 3 und den Turbinen 4, 5, 6, aufgeteilt. In den Vergleichen 70, 71, 72 wird die Differenz aus Sollwert und Istwert gebildet und über je einen Verstärker 73, 74, 75 den Einheitenreglern 76, 77, 78 zugeführt. Die Einheitenregler 76, 77, 78 verstellen ihrerseits über die Wandler 79, 80 und 81 die Turbinendrehzahl bzw. die Leitschaufeln des jeweiligen Kompressors 1, 2 oder 3. Die Wandler 67, 64, der Anteilsteller 35, der Vergleicher 70, der Verstärker 73, der Einheitenregler 76 und der Wandler 79 sind gemeinsam Teile des Maschinenreglers 28, der der Maschineneinheit zugeordnet ist, die aus der Turbine 4 und Kompressor 1 gebildet ist. Die Wandler 68, 65, der Anteilsteller 36, der Vergleicher 71, der Verstärker 74, der Einheitenregler 77 und der Wandler 80 sind gemeinsam Teile des Maschinenreglers 29, der der Maschineneinheit zugeordnet ist, die aus der Turbine 5 und Kompressor 2 gebildet ist. Die Wandler 69, 66, der Anteilsteller 37, der Vergleicher 72, der Verstärker 75, der Einheitenregler 78 und der Wandler 81 sind gemeinsam Teile des Maschinenreglers 30, der der Maschineneinheit zugeordnet ist, die aus der Turbine 6 und Kompressor 3 gebildet ist.

[0024] Istwert und Sollwert der Prozessgröße als Eingang der Wandler 67 bis 66 können beliebige Größen sein. Häufig sind es der Durchfluss durch die Kompressoren, der Druck vor oder hinter der Station, es kann aber auch die Lastverteilung der Kompressoren im Reihen- oder Parallelbetrieb sein. Denkbar ist auch das Druckverhältnis der gesamten Station oder eine Temperatur bzw. ein Flüssigkeitsstand in einem Behälter.

[0025] Der wesentliche Unterschied zwischen dem Stand der Technik gemäß Fig. 3 und der Erfindung gemäß Fig. 7 besteht darin, dass der in Fig. 3 gezeigte Masterregler 24 mit den Elementen 31 bis 40 komplett entfallen ist und seine Funktion auf die ohnehin vorhandenen Maschinenregler 28, 29, 30 aufteilt sind. Die Elemente 31 bis 34 sind ersatzlos entfallen und durch jeweils drei Elemente 64, 70 und 76; 65, 71 und 77 sowie 66, 72 und 78 ersetzt worden. Dafür entfallen die Wandler 38 bis 46. Viel wesentlicher ist jedoch, dass die dargestellten Funktionalitäten reine softwaremäßig realisierte Zusatzfunktionen in den jeweils ohnehin vorhandenen Maschinenreglern sind.

[0026] Nachfolgend sollen die Vorteile der erfindungsgemäßen Lösung gegenüber dem Stand der Technik an einem Beispiel durch Vergleich des Standes der Technik mit der Erfindung beschrieben werden. Drei Kompressoren 1, 2, 3 gemäß Fig. 2 werden mit einem Regelsystem gemäß Fig. 3 im Reihenzug (Stand der Technik) gefahren. Jeder der Kompressoren 1, 2, 3 fahre zu Beginn des Regelvorgangs mit einem Druckverhältnis von 3. Regelgröße sei der Druck in der druckseitigen Sammelleitung 19. Der Sollwert betrage 99 bar und der Istwert 90 bar. Die Kompressoren 1 bis 3 sollen jeweils ein Drittel des Gesamtdruckverhältnisses aufbringen. Der Vergleicher 32 stellt eine Abweichung von 9 bar fest und übermittelt dies an den Stationsregler 34. Dieser Stationsregler 34 erhöht seinen Ausgang um einen Anteil, der einer Erhöhung des Druckverhältnisses um 10% von 90 bar auf 99 bar entspricht, es soll hier beispielhaft eine Steigerung des Ausgangssignals von 45 auf 50% angenommen werden. Jede der drei Maschineneinheiten erhöht ihre Leistung im gleichen Maße so lange, bis der gemessene Istwert dem Sollwert entspricht.

[0027] Bei einem erfindungsgemäßen System nach Fig. 7 ergibt sich folgender Funktionsablauf. Der Istwert auf der Signalleitung 23 beträgt 90 bar und der Sollwert auf der Signalleitung 21 beträgt 99 bar. Über die Wandler 67 bis 69 erhalten alle drei Einheitenregler (Kapazitätsreglern) 76, 77 und 78 die gleiche Regeldifferenz von 9 bar. Jeder der drei Einheitenregler 76, 77 und 78 reagiert genau so wie der Masterregler 24 in Fig. 3. Jede der drei Maschineneinheiten erhöht ihre Leistung im gleichen Maße so lange, bis der gemessene Istwert dem Sollwert entspricht.

[0028] Bei Kompressoren im Reihenzug mit variablem Saugdruck erfolgt eine Regelung des Enddrucks stets derart, dass die Regelgröße das Druckverhältnis über der gesamten Station, sprich der Reihenschaltung aller Kompressoren ist. Auch bei Kompressoren im Reihenzug, die auf konstanten Durchfluss gefahren werden, ist das Verhältnis der Druckverhältnisse der einzelnen Kompressoren die zu regelnde Größe für die Einheitenregler.

[0029] Nach dem Stand der Technik muss davon ausgegangen werden, dass Probleme auftreten können, wenn die Eingangswandler für Sollwert und Istwert der einzelnen Einheitenregler eine voneinander abweichende Drift aufweisen oder durch die inkrementale Analog/Digitalwandlung unterschiedliche Zahlenwerte für Sollwert oder Istwert der einzelnen Maschinenregler ermitteln. In diesem Fall wird sich eine Abweichung der Gesamtförderleistung aller Kompressoren von der geforderten Leistung ergeben. Nach dem Stand der Technik wird dieser Nachteil als Grund dafür angesehen, dass ein überlagerter Masterregler zwingend erforderlich ist. Eingangs wurde auf diesen Nachteil bei Verwen-

dung von drei individuellen Druckreglern bereits hingewiesen.

[0030] Erfindungsgemäß wird dieses Problem durch den Einsatz eines Lastverteilungsreglers gelöst. Dieser Lastverteilungsregler wirkt zusätzlich zum Einheitenregler 76 bis 78 (Kapazitätsregler) und verwendet den gleichen Maschinenregler 28, 29, 30. Nachfolgend soll zunächst nur die Funktion des Lastverteilungsreglers unter Verwendung der bekannten Funktionsgruppen beschrieben werden. Anschließend wird die Kombination aus Kapazitätsregler und Lastverteilungsregler beschrieben. Dieser Lastverteilungsregler ist genau so aufgebaut wie der Einheitenregler 76 bis 78 (Kapazitätsregler) gemäß Fig. 7. Allerdings ist der Sollwert einer Lastverteilungsregelung der Soll-Lastanteil des Kompressors und der Istwert die aktuelle Last. Üblich ist, dass bei Kompressoren im Parallelbetrieb der Abstand des Arbeitspunkts von der Stabilitätsgrenze die Regelgröße ist und bei Kompressoren im Reihenbetrieb das Druckverhältnis. Bei einer Lastverteilungsregelung für Reihenbetrieb gemäß Fig. 7 ist der Istwert für jede Maschineneinheit das jeweilige Druckverhältnis des jeweiligen Kompressors und der Sollwert ist der Soll-Anteil des jeweiligen Kompressors am Gesamtdruckverhältnis. Der Istwert des Druckverhältnisses lässt sich durch Division des für die Pumpgrenzregelung gemessenen Enddrucks durch den für die Pumpgrenzregelung gemessenen Saugdrucks ermitteln. Das Gesamtdruckverhältnis errechnet sich durch Division des Stationsaustrittsdrucks durch den Stationseintrittsdruck. Üblich ist, dass alle Kompressoren im Reihenbetrieb mit jeweils gleichem Druckverhältnis gefahren werden, so dass der Sollwert für jeden einzelnen Lastverteilungsregler ein Drittel des Gesamtstationsdruckverhältnisses ist. Sollte das Verhältnis für einzelne Maschinen unterschiedlich sein, kann ein Skalierungsfaktor innerhalb der Sollwertbildung berücksichtigt werden. Sollte der Lastanteil der einzelnen Maschineneinheiten von weiteren Prozessgrößen abhängig sein, können variable Skalierungsfaktoren eingeführt werden.

[0031] Der Lastverteilungsalgorithmus errechnet für jeden der Kompressoren eine Teillast, bei Kompressoren im Parallelbetrieb z. B. einen vorgegebenen Anteil des Gesamtdurchflusses. Beim Reihenbetrieb gibt der Algorithmus z. B. einen fest vorgegebenen Anteil des gesamten geforderten Druckverhältnisses vor. Der Einheitenregler jedes Kompressors regelt nun die individuelle Maschineneinheit auf diesen Wert ein.

[0032] Weicht durch einen Messfehler oder einen Wandlerfehler der im Regler verarbeitete Istwert in einem der drei Einheitenregler vom im Kompressoren tatsächlich gefahrenen Istwert ab, erfassen alle Lastverteilungsregler diese vermeintliche Abweichung von der Soll-Lastverteilung und regelt diese durch Verstellung aller drei Kompressoren derart aus, dass die Lastverteilungsregler eine gleichmäßige Lastaufteilung sehen. Liefert der Wandler 67 für den Istwert der Einheit 1 z.B. einen 10% zu hohen Wert, so merkt jeder der jedem Kompressor zugeordneten Einheitenregler (Lastverteilungsregler) diese Abweichung und verfährt sein nachgeschaltetes Stellorgan um das vorgegebene Verhältnis. Im abgeglichenen Zustand fährt die Maschineneinheit 1 stabil mit einer 6,66% zu geringen Last und die Maschineneinheiten 2 und 3 stabil mit je einer um 3,33% zu hohen Last. Die Folge ist ein Unbalance aller drei Kompressoren. Diese ist aber geringer als der einzelne Fehler der betroffenen Maschineneinheit.

[0033] Das System arbeitet sogar robust, wenn Sollwert und Istwert für jede Maschineneinheit getrennt ermittelt werden und dadurch größere Abweichungen zwischen den Sollwerten und Istwerten der einzelnen Regler vorliegen. Dieses stellt einen weiteren Vorteil des Verfahrens gemäß Erfindung dar. Eine Störung an einer gemeinsamen Istwertmessung beeinflusst den Betrieb aller Maschineneinheiten in der Station. Gleiches gilt für eine Störung des Sollwertstellers. Nach diesem Verfahren kann die Istwertmessung jeder einzelnen Maschineneinheit zugeordnet werden. Fig. 8 zeigt z. B. eine Anordnung mit individueller Istwertmessung. Statt einer gemeinsamen Istwertmessung in der druckseitigen Sammelschiene 18 kann der Istwert (Enddruck hinter den Kompressoren, vor den Kompressoren oder Durchfluss durch die Kompressoren) in den jeweiligen Austrittsleitungen 15, 16 und 17 mit Sensoren gemessen werden, die mit Wandlern 90, 91 und 92 verbunden sind. Die einzelnen Istwerte werden dann über die Wandler 69, 64 und 65 auf die Vergleiche 70, 71 und 72 gemäß Fig. 7 gegeben und den Maschinenreglern 28, 29, 30 zugeführt. Möglich ist, auch den Sollwert individuell vorzugeben. Damit sind dann alle erforderlichen Funktionalitäten individuell jeder Maschineneinheit zugeordnet. Wandlungsfehler der Sollwert- und Istwerterfassung beim Einsatz des erfindungsgemäßen Regelverfahrens als Kapazitätsregler (Durchflussregler, Druckregler) werden in gleicher Weise ausgeglichen.

[0034] Der Vorteil einer solchen Anordnung liegt zum Einen darin, dass jede der Istwertmessungen einer Maschineneinheit zugeordnet werden kann und die Versorgung der Wandler mit Hilfsenergie aus den Steuerschränken der jeweils zugeordneten Maschineneinheit erfolgen kann. Weiterhin sind selbst bei einem Totalausfall von Sollwert- oder Istwertwandlern einer Maschineneinheit die entsprechenden Einheiten der anderen Maschineneinheiten aktiv und reduzieren dadurch die negativen Auswirkungen dieses Ausfalls. Es ist auch möglich, Sollwert und Istwert getrennt für jede Maschineneinheit zu bilden. Vorteil ist, dass keinerlei gemeinsame Komponenten mehr vorhanden sind und nur identische Maschinenanlagen ohne überlagerte Anlagenteile zum Einsatz kommen.

[0035] Als Beispiel sei der zuvor beschriebene Fall bei Einsatz des Einheitenreglers als Druckregler benannt. Der gewünschte Enddruck beträgt 99 bar. Die Kompressor 1 bis 3 sollen jeweils ein Drittel der aktuell benötigten Gesamtleistung erbringen. Hierzu erbringe jede Turbine 4 bis 6 jeweils 20% der insgesamt verfügbaren Leistung. Nun falle die Istwertmessung in der Druckleitung 17 des Kompressors 3 aus und gebe einen Istwert von 0 bar aus. Die Turbine 6 fährt wegen des fehlenden Istwerts auf ihre Maximalleistung und erbringt dadurch 33% der Gesamtleistung. Dadurch steigt der Druck in der druckseitigen Sammelleitung 18 und damit auch der Enddruck aller Kompressoren 1, 2, 3. Die

beiden intakten Messeinrichtungen in den Kompressoraustrittsleitungen 15 und 16 der Kompressoren 1 und 2 bemerken diesen Anstieg und fahren die Kompressoren 1 und 2 in der Leistung so weit herunter, dass der Enddruck aller drei Kompressoren 1, 2, 3 wieder dem Sollwert 99 bar entspricht. Eine Station, die nach dem Stand der Technik mittels Masterregler geregelt wird, fährt alle Kompressoren in diesem Betriebsfall auf 100% Leistung. Gleiches passiert bei Ausfall eines Sollwerts. Ein Masterregler fährt alle Maschinen auf null und die gesamte Station bringt keine Leistung mehr. Bei einem Regelverfahren gemäß der Erfindung fährt der Kompressor, dessen Sollwert auf null fällt, fährt in seiner Leistung auf null, die beiden anderen Kompressorregelungen bemerken diese Abweichung und regeln sie durch Steigern der jeweils eigenen Leistung aus, so dass der Betrieb der Station als Gesamtheit nicht beeinflusst wird.

[0036] Der Vorteil der erfindungsgemäßen Lösung liegt auf der Hand, es kann auf den Masterregler verzichtet werden, dadurch werden Kosten eingespart und die Verfügbarkeit erhöht. Darüber hinaus bietet dieses Verfahren den Vorteil, auf eine gemeinsame Istwertmessung und auf eine gemeinsame Sollwertgenerierung zu verzichten und sowohl Istwertmessung als auch Sollwerteinstellung jeder Kompressoreinheit zuzuordnen. Ganz wesentlich ist außerdem, dass die Verfügbarkeit erhöht und die Gesamtanlage weniger störungsanfällig wird

[0037] Nachfolgend sollen einige Varianten und Ausgestaltungen für die Aufteilung der Last auf die einzelnen Kompressoren beschrieben werden.

[0038] In vielen Anwendungsfällen ist es erforderlich, den Anteil der einzelnen Maschineneinheiten an der Gesamtlast beeinflussen zu können. In einigen Fällen kann z. B. das Personal, das die Fahrweise der Station vorgibt, den Anteil der Belastung einzelner Maschineneinheiten beeinflussen wollen. Soll z. B. eine Maschineneinheit außer Betrieb genommen werden, ist es sinnvoll, den Anteil dieser Einheit an der Gesamtlast herunterzufahren. Dieses kann dadurch geschehen, dass der Summierstelle 70, 71 oder 72 ein fester Wert zum Vertrimmen des Gleichgewichts aufaddiert wird. Dies führt dazu, dass der Lastverteilungsregler nicht mehr alle Maschineneinheiten gleich belastet, sondern unterschiedlich. Beispiel: Ohne diese Vertrimmung fährt jeder von drei Kompressoren im Serienbetrieb mit einem Drittel des gesamten Druckverhältnisses. Wird nun dem Summierer 71 (für den mittleren Kompressor) eine Vertrimmgröße von minus 20% aufaddiert, regeln die drei Maschinenregler so lange, bis das Druckverhältnis des mittleren Kompressors genau 20% kleiner ist als das der anderen beiden.

[0039] Eine andere Möglichkeit besteht darin, den Sollwert für die Lastverteilung für jeden der Kompressoren individuell und unterschiedlich vorzugeben. Dies kann z. B. erforderlich sein, wenn eine Unsymmetrie in den Maschineneinheiten vorliegt. Es können z. B. Maschineneinheiten unterschiedlicher Baugröße zusammen in einer Station fahren. In diesem Fall muss der Faktor an die Baugröße der Maschineneinheiten angepasst sein.

[0040] Eine weitere Möglichkeit ist, dass ein optimierungsalgorithmus eine für den jeweiligen Betriebspunkt optimale Kombination der Maschinenbelastung der einzelnen Maschineneinheiten ermittelt. Solche Optimierungsalgorithmen sind z. B. in der eingangs erwähnten EP-B-0 431 287 beschrieben. Bei Anwendung der Erfindung auf dieses bekannte Verfahren kann auch bei dem bekannten Verfahren auf einen überlagerten Rechner und Masterregler verzichtet werden, wenn der Algorithmus in jeden Maschinenregler programmiert wird.

[0041] Ein weiteres Bedürfnis zum Eingriff in die Wahl der Lastaufteilung auf die einzelnen Maschineneinheiten kann z. B. auch das Erreichen einer Grenze des zulässigen Betriebsbereich an einer der Komponenten sein. Werden z. B. Gasturbinen unterschiedlicher Bauart als Antriebsmaschinen für Kompressoren eingesetzt, kann eine der Gasturbinen z. B. die maximale Abgastemperatur erreicht haben, während die anderen Gasturbinen noch über Stellreserven verfügen. Die Erfindung bietet zwei Lösungsansätze für dieses Problem. Der eine Ansatz besteht darin, dass der Faktor für die Aufteilung der Last auf die nicht in der Grenze befindlichen Maschineneinheiten derart verändert wird, dass die Faktoren im Verhältnis der nicht mehr zur Verfügung stehenden Maschineneinheiten erhöht wird. Der Faktor für die Maschine im Grenzbetrieb wird auf null gestellt, solange die Maschine in der Grenze betrieben wird. Das erfindungsgemäße Verfahren kompensiert diesen Vorgang aber auch ohne diesen Eingriff. Da die an der Grenze betriebene Einheit keine weitere Leistung mehr abgibt, stellt der Kapazitätsregler eine Abweichung vom Sollwert fest und erhöht die Leistung der anderen Einheit derart, dass die zu regelnde Prozessgröße genau dem Sollwert entspricht. Stellorgan bzw. Eingriffsstelle für alle diese Faktoren zur Vertrimmung sind die Anteilsteller 35 bis 37 bzw. die Addition eines Festwertes auf die Summierer 70 bis 72.

[0042] In den Fig. 9 bis 11 sind drei parallel geschaltete Kompressoren der Niederdruckstufe (ND-A, ND-B, ND-C) mit drei parallel geschalteten Kompressoren der Mitteldruckstufen (MD-A, MD-B, MD-C) und drei parallel geschalteten Kompressoren der Hochdruckstufe (HD-A, HD-B, HD-C) in Reihe geschaltet. In den Fig. 10 und 11 ist das Regelsystem für den Kompressor MD-B vergrößert dargestellt. Die übrigen Kompressoren sind mit einem identischen Regelsystem ausgerüstet. Jeder Kompressor ist mit einer Pumpgrenzregelung versehen, die in Verbindung mit der Fig. 6 bereits beschrieben ist. Ferner ist jeder aus Kompressor und Turbine bestehenden Maschineneinheit ein Maschinenregler 85 zugeordnet.

[0043] In der druckseitigen Sammelschiene 18 ist ein Sensor zur Bestimmung des Istwertes des Enddruckes der Station angeordnet. Der Messwert wird einem Wandler 86 zugeführt, der über eine Signalleitung 87 mit einem Vergleichler 88 verbunden ist. Diesem Vergleichler 88 wird außerdem von der Sollwertvorgabe der Sollwert des Enddruckes zugeführt.

[0044] In der druckseitigen Sammelschiene 18 ist ferner ein Sensor zur Bestimmung des Istwertes des Durchflusses der Station angeordnet. Der Messwert wird einem Wandler 89 zugeführt, der über eine Signalleitung 90 mit einem Vergleichler 91 verbunden ist. Diesem Vergleichler 91 wird außerdem von der Sollwertvorgabe der Sollwert des Durchflusses zugeführt.

[0045] In der saugseitigen Sammelschiene 13 ist ein Sensor zur Bestimmung des Istwertes des Saugdruckes der Station angeordnet. Der Messwert wird einem Wandler 92 zugeführt, der über eine Signalleitung 93 mit einem Vergleichler 94 verbunden ist. Diesem Vergleichler 94 wird außerdem von der Sollwertvorgabe der Sollwert des Saugdruckes zugeführt.

[0046] Die Signalleitung 93 des Saugdruckes und die Signalleitung 87 des Enddruckes sind zu einer Rechenstelle 95 geführt, in der das Gesamtdruckverhältnis errechnet wird. Das Druckverhältnis kann zusätzlich mit einem festen oder auch einem von anderen Größen abhängigen variablen Faktor bewertet werden. Im ersten Ansatz ist der Faktor $1/3$, das heißt alle drei Kompressoren werden gleich gelastet. Hinter dem Wandler 62 für den Enddruck des Kompressors MD-B ist eine Signalleitung 96 abzweigend, die zu einer Rechenstelle 97 geführt ist. Hinter dem Wandler 61 für den Saugdruck des Kompressors MD-B ist eine Signalleitung 98 abzweigend, die ebenfalls zu einer Rechenstelle 97 geführt ist. In der Rechenstelle 97 wird das Druckverhältnis eines einzelnen Kompressors ermittelt. Die Rechenstellen 95 und 97 sind mit einem Vergleichler 99 verbunden, in dem das Einzeldruckverhältnis dieses Kompressors MD-B mit seinem Soll-Anteil (des mit einem Faktor bewerteten) Gesamtdruckverhältnisses verglichen wird.

[0047] Von dem Pumpgrenzregler 59 ist eine Signalleitung 100 zu einer Rechenstelle 101 geführt. Die Signalleitung 100 führt ein den Abstand des Betriebspunktes eines einzelnen Kompressors beinhaltendes Signal. Der Rechenstelle 101 werden außerdem die entsprechenden Signale der übrigen parallel geschalteten Kompressoren zugeführt. In der Rechenstelle 101 wird der Mittelwert der Abstände der Betriebspunkte ermittelt. In einem Vergleichler 102 wird der Mittelwert der Abstände mit dem Einzelwert eines Kompressors verglichen. Die Vergleichler 88, 91, 94 sind über Signalleitungen, in denen jeweils ein Umschalter 103 angeordnet ist, mit einem Summierer 104 verbunden. Die Vergleichler 99, 102 sind über Signalleitungen, in denen jeweils ein Umschalter 105 angeordnet ist, mit einem Summierer 106 verbunden. Auch der Summierer 104 ist mit dem Summierer 106 verbunden.

[0048] Die Summierer 104, 106 sind über eine Signalleitung 107, in der ein Handeingriff 108 angeordnet ist, mit dem zu einer Maschineneinheit gehörenden Maschinenregler 85 verbunden, der die Funktionen eines Kapazitäts-, eines Enddruck-, eines Saugdruck-, eines Durchfluss- und eines Lastverteilungsreglers ausübt.

[0049] Das in der Fig. 11 dargestellte Regelsystem enthält zusätzlich noch eine Maximalauswahl 109 und eine Minimalauswahl 110, um Drehzahl und Last der Antriebsmaschine oder sonstige Größen zu begrenzen.

[0050] Bei dem gezeigten Regelsystem für den Reihen- und Parallelbetrieb wird die Kapazitätsregelung und die Lastverteilungsregelung der Station von jeweils eine einzigen jeder Maschineneinheit zugeordneten Maschinenregler vorgenommen. Vor dem Maschinenregler werden Regeldifferenzen für die Kapazitätsregelung, die Lastverteilungsregelung im Parallelbetrieb und die Lastverteilungsregelung im Reihenbetrieb gebildet. Bei diesem Regelsystem kann zwischen drei verschiedenen Kapazitätsregelalgorithmen gewählt werden (Durchflussregelung, Enddruckregelung hinter dem Hochdruckkompressor und Saugdruckregelung vor dem Niederdruckkompressor). Da der Kapazitätsregler nur eine Größe regeln kann, werden die beiden anderen Regeldifferenzen der Kapazitätsregelung über die Schalter 103 zu null geschaltet. Hier ist eine gegenseitige Verriegelung sinnvoll. Soll z. B. die Durchflussregelung aktiv sein, wird die Regeldifferenz für die Saugdruck- und die Enddruckregelung zu null geschaltet. Alternativ kann auch der Sollwert für den nicht aktiven Regler auf den Istwert geschaltet werden. Auch dadurch wird die Regeldifferenz zu null.

[0051] Soll einer der Lastverteilungsregler deaktiviert werden, geschieht das Gleiche. Die zugehörige Regeldifferenz wird einfach zu null geschaltet. Dies kann auf elegante Weise dadurch geschehen, dass die Optimierungsgröße (Istwert der Lastverteilung) auf den Sollwert geschaltet wird. Gleiches geschieht auch, wenn ein Kompressor außer Betrieb ist. Die Lastverteilungsregler der anderen Kompressoren gehen einfach davon aus, dass die außer Betrieb befindlichen Kompressoren optimiert sind und daher keinen Einfluss auf die Lastverteilung auf die anderen Kompressoren haben.

[0052] Es besteht auch die Möglichkeit, die Maschinen ausschließlich im Handbetrieb zu betreiben. Hierzu werden alle Regeldifferenzen auf null geschaltet, d. h. alle Regler sind ausgeschaltet. Der in Bild 10 und 11 gezeigte Handeingriff kann genutzt werden, um per Hand gesteuert eine künstliche Regeldifferenz als Steuergröße aufzuprägen. Der jeweilige Maschinenregler folgt dieser Differenz so lange, wie die Größe ansteht. Da der Regler in aller Regel auch integrales Verhalten hat (PI oder PID-Regler), reagiert der Integralteil des Reglers auf diese feste Regeldifferenz im Eingang durch kontinuierliche Verstellung des Ausgangs. In einer besonderen Ausgestaltung kann diese Handverstellung nur auf den Integralteil des Reglers wirken, so dass der Proportional (P) und der Differentialanteil (D) auf diesen Handeingriff nicht reagieren. Alternativ kann die Handverstellung auch dadurch erfolgen, dass der Regler 85 auf "Hand" geschaltet wird.

[0053] Zur Verdeutlichung soll nachfolgend ein Beispiel beschrieben werden. Die Kompressoren in Reihe werden Niederdruck- (ND), Mitteldruck- (MD) und Hochdruckkompressor (HD) genannt. Die Parallelkompressoren heißen A, B, C. Es sei angenommen, die Anlage sei in Betriebsart Durchflussregelung und alle Kompressoren sind in Betrieb.

EP 1 340 919 A2

[0054] Im Parallelbetrieb sei der Durchflusssollwert sei 2% größer als der Istwert, Kompressor ND-A fördere genau 1/3 des gesamten Massenstrom, Kompressor ND-B 5% zu wenig und Kompressor ND-C 5% zu viel. Kompressor MD-A und MD-B fördern 30% des Massenstroms und Kompressor MD-C 40%. Jeder der HD-Kompressoren fördere den gleichen Massenstrom.

[0055] Im Reihenbetrieb werde Kompressor ND-A 2% zu gering belastet, Kompressor MD-A werde richtig belastet und Kompressor HD-A 2% zu hoch belastet. Kompressor ND-B wird richtig belastet, Kompressor MD-B 3% zu hoch und Kompressor HD-B 3% zu niedrig. Kompressor ND-C werde mit 29% belastet, MD-C mit 36% und HD-C mit 35%.

[0056] Es stellen sich folgende Regeldifferenzen an den Summierern ein:

	Summierer des MD-B Kompressors	HD-A	HD-B	HD-C
Kapazität		+2	+2	+2
Parallel		+2	0	-2
Serie		-2	+3	-1,7
		MD-A	MD-B	MD-C
Kapazität	(104)	+2	+2	+2
Parallel	(102)	+3,3	+3,3	-6,6
Serie	(99)	0	-3	-3,3
		ND-A	ND-B	ND-C
Kapazität		+2	+2	+2
Parallel		0	0	0
Serie		+2	0	+5,1

[0057] Der Regelalgorithmus bildet nun jeweils vor den Reglern die resultierende Regeldifferenz. Daraus ergibt sich

	HD-A	HD-B	HD-C
Kapazität	+2	+2	+2
Parallel	+2	0	-2
Serie	-2	+3	-1,7
Summe	+2	+5	-1,7
	HD-A	HD-B	HD-C
Kapazität	+2	+2	+2
Parallel	+3,3	+3,3	-6,6
Serie	0	-3	-3,3
summe	+5,3	+2,3	-7,9
	HD-A	HD-B	HD-C
Kapazität	+2	+2	+2
Parallel	0	0	0
Serie	+2	0	+5,1
Summe	+4	+2	+7,1

[0058] Trotz der z. T. widersprüchlichen Anforderungen der einzelnen Regelaufgaben (Kapazitätsregler verlangt eine Leistungssteigerung, der Lastverteilungsregler eine Absenkung) erhält jeder Maschinenregler einen eindeutigen Stellbefehl in die erforderliche Richtung, um direkt das Optimum zu erreichen. Eine Wechselwirkung zwischen den unterschiedlichen Anforderungen ist per Design ausgeschlossen.

[0059] In einer weiteren Ausgestaltung können noch weitere Algorithmen zugefügt werden. Die Antriebsmaschinen eines oder mehrerer Kompressoren können z. B. eine Leistungsgrenze erreichen. Dies kann zusätzlich in dem Algorithmus dergestalt verarbeitet werden, dass die Regeldifferenz der Maschinenregler der Antriebsmaschinen, die an

der Grenze betrieben werden, zu null gemacht werden (wie im Handbetrieb). Diese Antriebsmaschinen nehmen dann an einer weiteren Leistungssteigerung nicht mehr teil. Zur Kompensation dieses Einflusses kann die Differenz aus der optimalen Verstelldifferenz gemäß obiger Tabelle und der tatsächlich wirksamen Differenz auf die Regeldifferenz der anderen Parallel- und Reihenkompressoren aufaddiert wird. Hiermit wird auch dieser Eingriff optimal kompensiert. Das Verfahren funktioniert selbstverständlich auch für mehrere Begrenzungsregler pro Maschineneinheit.

[0060] In einer weiteren Ausgestaltung können die Begrenzungsregler wie in Fig. 11 dargestellt über eine Extremwertauswahl (Maximalauswahl oder Minimalauswahl) geschaltet sein. Zusätzlich zu den oben beschriebenen Regeldifferenzen werden Regeldifferenzen für die Abstände des Betriebspunkts von den Grenzen gebildet, so in Fig. 11 z. B. von der Maximaldrehzahl und der Minimaldrehzahl. Zusätzlich sind die Bildung je einer weiteren Regeldifferenz für eine Maximal- und Minimalbegrenzung dargestellt. Die Regeldifferenzen für Begrenzungen auf Maximalwerte sind einer Minimalauswahl aufgeschaltet, die Regeldifferenzen für eine Minimalgrenze wirken auf eine Maximalauswahl. Die wirksame Regeldifferenz für den Maschinenregler ist somit entweder die Regeldifferenz gemäß obigem Algorithmus oder aber der Abstand des Betriebspunkts von der Grenze, wenn dieser Abstand geringer ist. Bei einer Überschreitung einer Grenze steuert der Ausgang der Max/Min-Auswahl 109/110 die Maschineneinheit auch bei widersprüchlicher Anforderung von Kapazität- oder Lastverteilungsregler vorrangig stets so, dass die Grenze im stationären Betrieb nicht überschritten wird.

[0061] Nach obigem Beispiel soll der Kompressor ND-C mit einer Regeldifferenz von 6,3% in seiner Leistung gesteigert werden. Die Antriebsturbine befindet sich aber 3 % unterhalb der maximalen Betriebsdrehzahl. Die wirksame Regeldifferenz ist damit auf 3% begrenzt. Sobald die Turbine die maximale Betriebsdrehzahl erreicht hat, wird die Regeldifferenz der Drehzahlbegrenzungsregelung zu null und verhindert über die Minimalauswahl jegliche positive Regeldifferenz auf den Maschinenregler. Nur negative Regeldifferenzen in Richtung Drehzahlabsenkung können passieren. Bei Überschreiten der maximalen Drehzahl steuert der Einheitenregler die Drehzahl herunter.

[0062] Gelegentlich kann es erforderlich sein, dass die einzelnen Regelkreise (Druckregler, Durchflussregler, Lastverteilungsregler in Reihe, Lastverteilung parallel) auf unterschiedliche Reglerparameter eingestellt werden müssen, da das Streckenzeitverhalten der Regelstrecke für die einzelnen Regelgrößen unterschiedlich ist. Dies kann auf einfache Weise dadurch geschehen, dass die jeweiligen Regeldifferenzen mit unterschiedlichen Verstärkungsfaktoren behaftet werden. Wird z. B. die Regeldifferenz des Druckreglers mit einem Faktor 1 multipliziert, die Regeldifferenz des Durchflussreglers mit einem Faktor 2 und die des Lastverteilungsreglers mit einem Faktor 3, führt dies dazu, dass die Kreisverstärkung des Lastverteilungsreglers dreimal so groß ist wie die des Druckreglers.

[0063] Soll die Reglernachstellzeit individuell angepasst werden, kann dies durch einfache Weise geschehen. Aus einem Vergleich von der einzelnen Eingänge der Maximal- und Minimalauswahl mit dem Ausgang kann ermittelt werden, welche Größe die führende ist. Aus einer Stellung der Umschalter für die Regeldifferenzen der Kapazitätsregler und der Lastverteilungsregler kann ermittelt werden, welcher dieser Regler in Betrieb ist. Eine Auswahlmatrix kann nun bestimmen, bei welcher Reglerkombination welche Reglernachstellzeit wirksam sein soll. Die im Maschinenregler wirksame Reglerzeitkonstante kann nun adaptiv genau so angepasst werden, wie es die Auswahlmatrix verlangt.

[0064] Bild 11 zeigt eine Anwendung mit insgesamt neun Regelkreisen. Würde ein solches System nach dem Stand der Technik aus neun einzelnen Reglern aufgebaut werden, wären umfangreiche Nachführungen und gegenseitige Verriegelungen erforderlich, die verhindern, dass einzelne nicht aktive Regler in die Sättigung laufen. Weiterhin besteht die große Gefahr, dass sich die neun Regler gegenseitig dynamisch beeinflussen. Alle diese Nachteile werden erfindungsgemäß umgangen. Es gibt nur einen einzigen Maschinenregler pro Maschineneinheit. Jegliche Nachführung kann entfallen und eine Wechselwirkung zwischen Reglern kann es auch nicht geben. Die Maschinenregler der anderen Kompressoren können sich auch nicht gegenseitig beeinflussen, da alle Maschinenregler für gleiche Regelgrößen auf gleiche Parameter eingestellt sind. Da alle Lastverteilungsregler mit gleichen Parametern optimiert sind, haben sie gleiches Zeitverhalten. Es kann demzufolge nicht geschehen, dass einzelne Maschinen in unterschiedliche Richtungen und damit auseinander laufen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Regeln von mehreren in einer Station zusammenwirkenden Strömungsmaschinen im Parallel- oder Reihenbetrieb zur Einhaltung mindestens einer von der Station vorgegebenen und allen Strömungsmaschinen gemeinsamen Prozessgröße, wobei jede Strömungsmaschine mit der sie antreibenden Antriebsmaschine eine Maschineneinheit bildet, der ein Maschinenregler zugeordnet ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** die vorgegebene, gemeinsame Prozessgröße direkt auf jeden der Maschinenregler aufgegeben wird und dass diese vorgegebene, gemeinsame Prozessgröße ausschließlich über die der jeweiligen Maschineneinheit zugeordneten Maschinenregler ausgeregelt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Prozessgröße der Enddruck der Kompressoren

verwendet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Prozessgröße der Durchfluss durch die Kompressoren verwendet wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Prozessgröße der Saugdruck der Kompressoren verwendet wird.

5. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Prozessgröße das Druckverhältnis der Kompressoren verwendet wird.

6. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Prozessgröße die Lastverteilung im Parallelbetrieb verwendet wird.

7. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Prozessgröße die Lastverteilung im Serienbetrieb verwendet wird.

8. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Prozessgröße die Leistung der als Antriebsmaschinen dienenden Turbinen verwendet wird.

9. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Prozessgröße der Eintrittsdruck der als Antriebsmaschinen dienenden Turbinen verwendet wird.

10. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Prozessgröße der Austrittsdruck der als Antriebsmaschinen dienenden Turbinen verwendet wird.

11. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Prozessgröße der Entnahmedruck der als Antriebsmaschinen dienenden Turbinen verwendet wird.

12. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Prozessgröße der Durchfluss durch eine als Antriebsmaschine dienende Turbine verwendet wird.

13. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Prozessgröße der Strom einer elektrischen Antriebsmaschine wird.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** mehrere Prozessgrößen innerhalb einer Station kombiniert werden.

15. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ausgangsgrößen der Kapazitätsregler im gleichen Verhältnis zueinander stehen, um eine gleichmäßige Belastung aller Maschinen zu erreichen.

16. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Sollwerte für die Lastverteilungsregler im festen aber nicht gleichen Verhältnis zueinander stehen, um eine vorbestimmte ungleichmäßige Belastung aller Maschinen zu erreichen.

17. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Faktor, mit dem die Sollwerte der Lastverteilungsregler voneinander abweichen, eine Funktion einer Prozessgröße ist, um eine gewünschte Belastung aller Maschinen zu erreichen.

18. Verfahren nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet, dass** als beeinflussende Prozessgröße die Leistung der als Antriebsmaschine dienenden Turbine verwendet wird.

19. Verfahren nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Abstand einer Prozessgröße von einer Grenze oder einen beliebigen anderen Optimierungsalgorithmus bestimmt wird.

20. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Faktor, mit dem die Sollwerte der Lastverteilungsregler voneinander abweichen, willkürlich beeinflussbar wird, um eine gewünschte Belastung aller Maschinen zu erreichen.

21. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** Sollwerte und Istwerte gemeinsam für alle Maschineneinheiten vorgegeben und gemessen werden.
- 5 22. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** Sollwerte und Istwerte individuell für jede Maschineneinheit vorgegeben und gemessen werden.
- 10 23. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** zwischen den Regeldifferenzen mehrerer Prozessgrößen eine ausgewählt und die übrigen, nicht benötigten Regeldifferenzen zu null geschaltet werden.
- 15 24. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** zwischen den Regeldifferenzen mehrerer Prozessgrößen eine ausgewählt und der Sollwert einer der nicht ausgewählten Prozessgrößen auf den Istwert geschaltet wird.
- 20 25. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Regeldifferenzen aller Prozessgrößen auf null geschaltet sind und dass die Regelung von Hand vorgenommen wird.
- 25 26. Verfahren nach Anspruch 23, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei Verwendung eines Maschinenregler mit einem Proportionalteil und einem Integralteil die Regelung von Hand so vorgenommen wird, dass der Eingriff von Hand nur auf den Integralteil wirkt.
- 30 27. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Regeldifferenz der Maschinenregler der Maschineneinheiten, die an der oberen Leistungsgrenze betrieben werden, zu null gemacht wird und dass die tatsächlich wirksame Regeldifferenz auf die Regeldifferenz der anderen Maschineneinheiten aufaddiert wird.
- 35 28. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 25, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Regeldifferenz über eine Extremauswahl geschaltet ist.
- 40 29. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 26, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Regeldifferenzen für Begrenzungen aus Maximalwerte einer Minimalauswahl aufgeschaltet werden und dass die Regeldifferenzen für eine Minimalgrenze auf eine Maximalauswahl wirken.
- 45 30. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 26, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Regeldifferenzen für unterschiedliche Prozessgrößen mit unterschiedlichen Verstärkungsfaktoren multipliziert werden.
- 50 31. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 28, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Nachstellzeit der Regler in der Weise individuell angepasst wird, dass aus einem Vergleich der einzelnen Eingänge der Maximal- und Minimalauswahl mit dem Ausgang ermittelt wird, welche Prozessgröße die führende ist, dass aus der Stellung der Umschalter der Regler für die Prozessgrößen ermittelt wird, welcher Regler in Betrieb ist und dass über eine Auswahlmatrix bestimmt wird, bei welcher Reglerkombination welche Nachstellzeit wirksam sein soll.
- 55

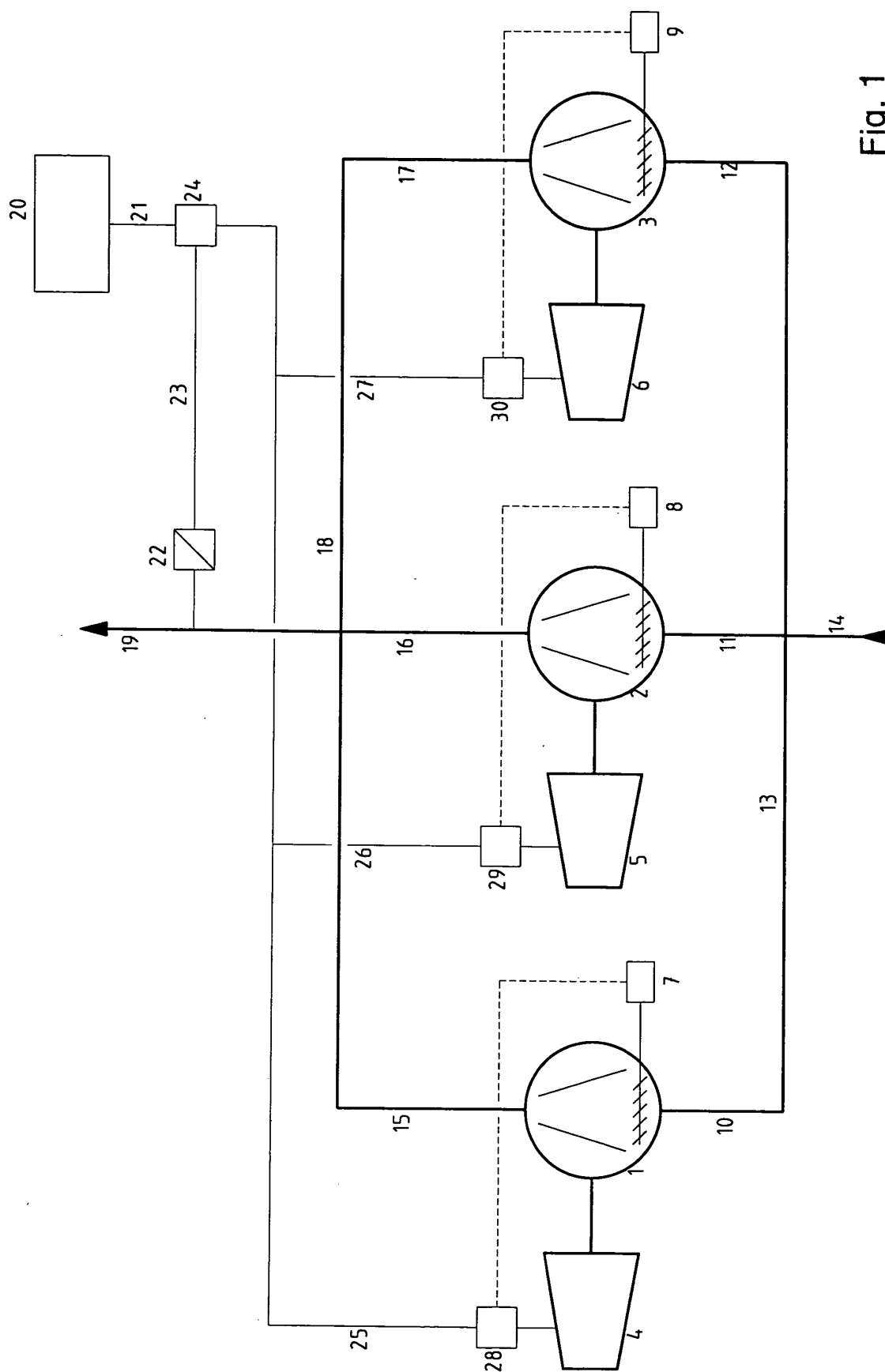


Fig. 1

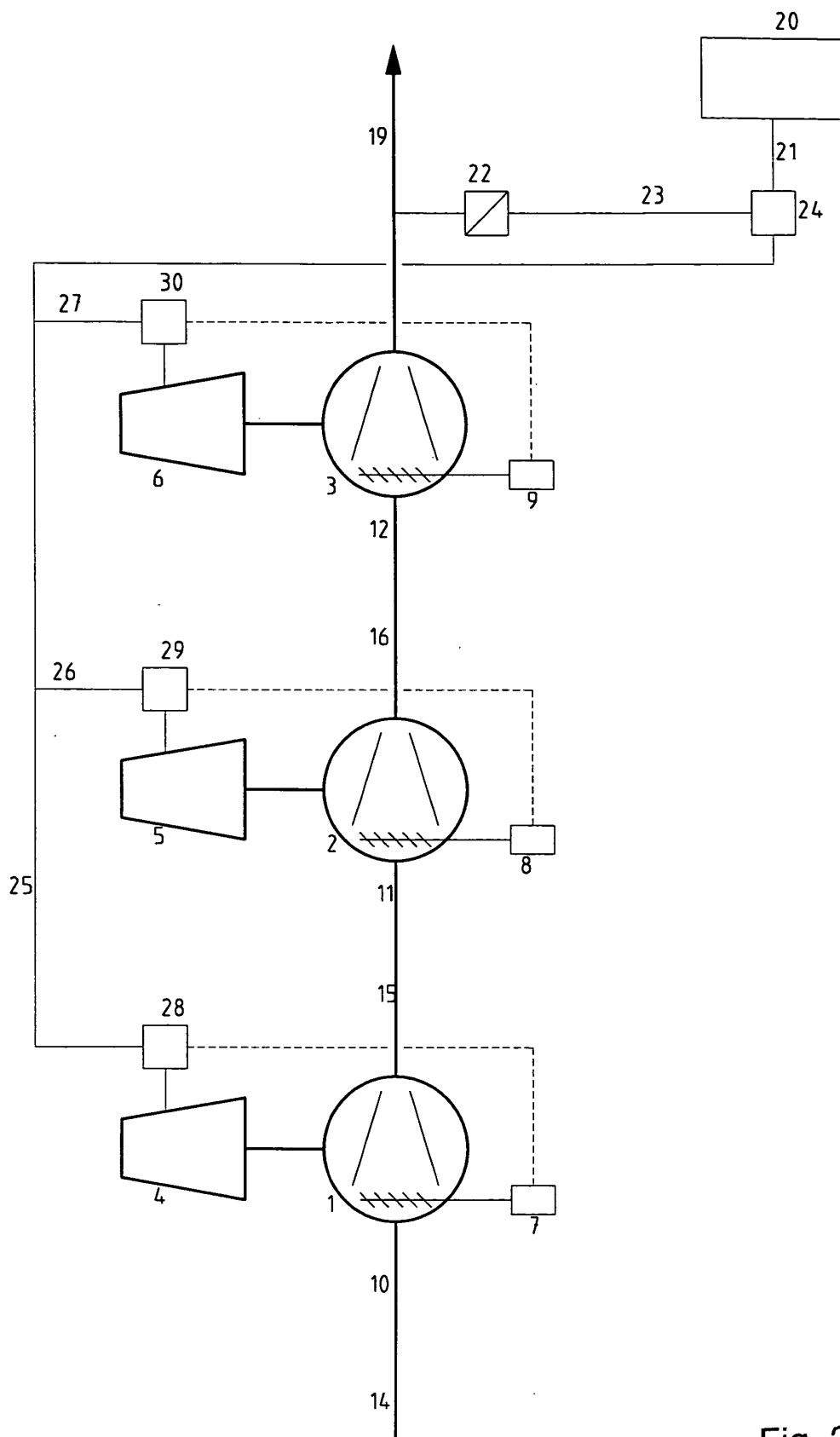


Fig. 2

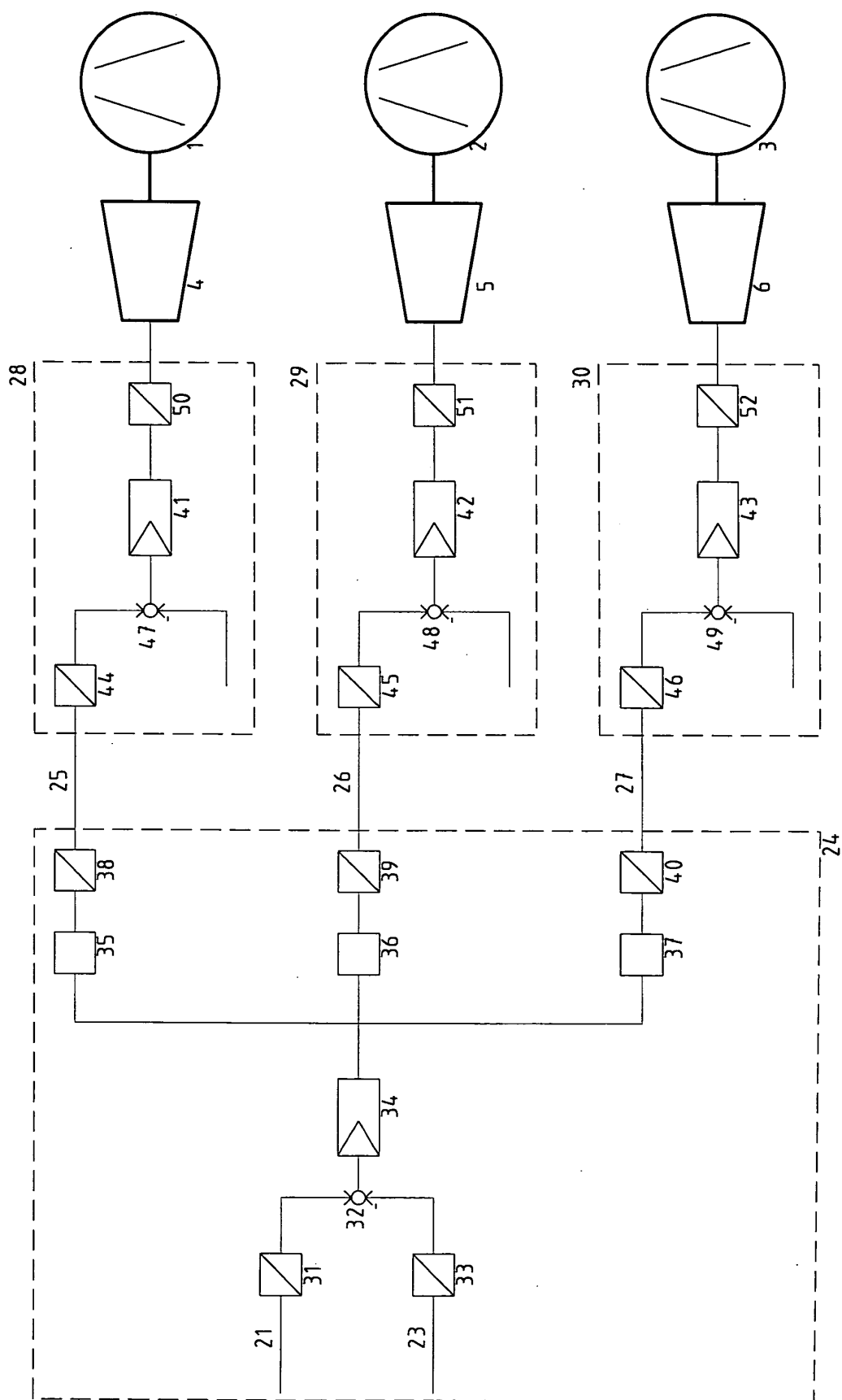


Fig. 3

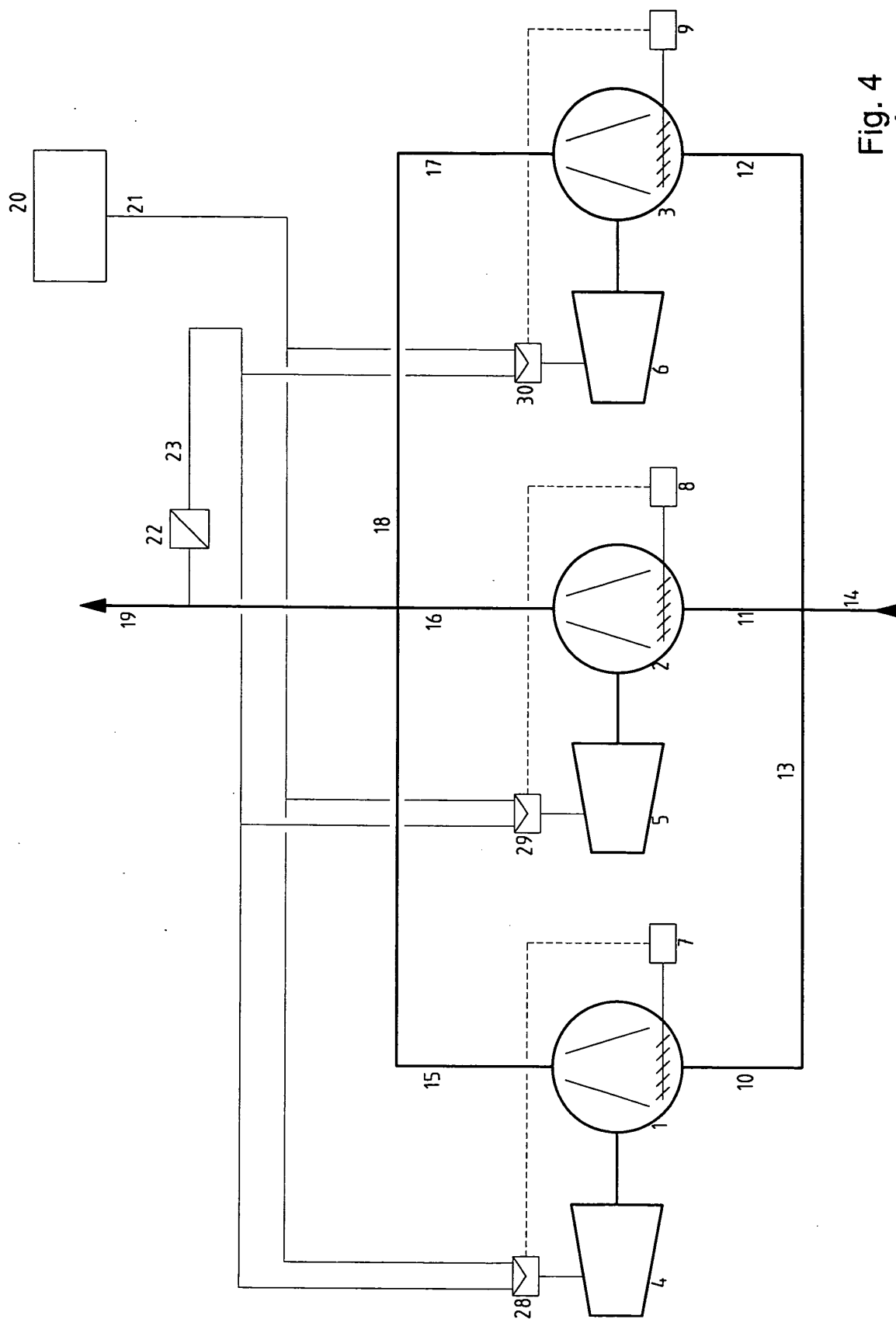


Fig. 4

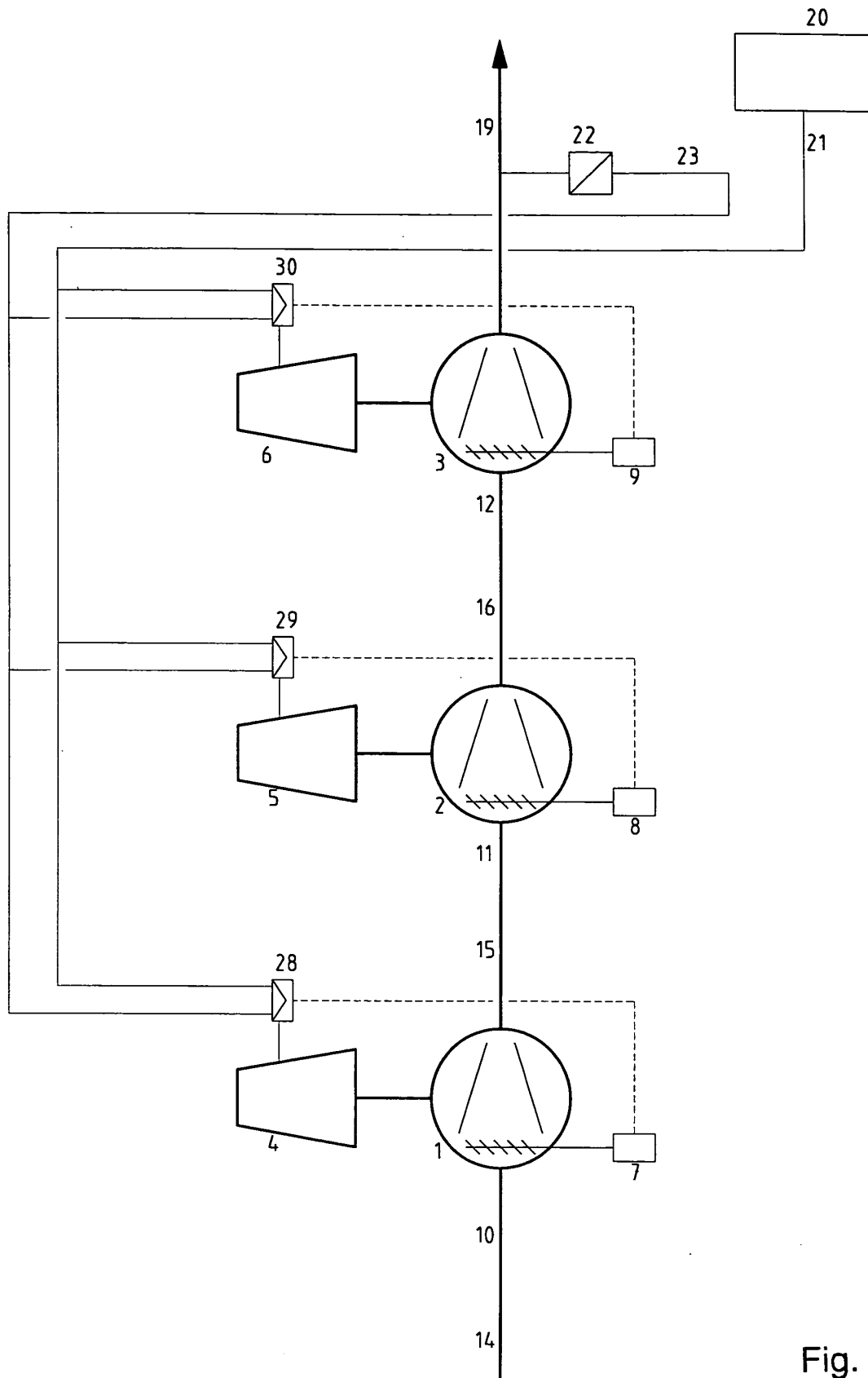


Fig. 5

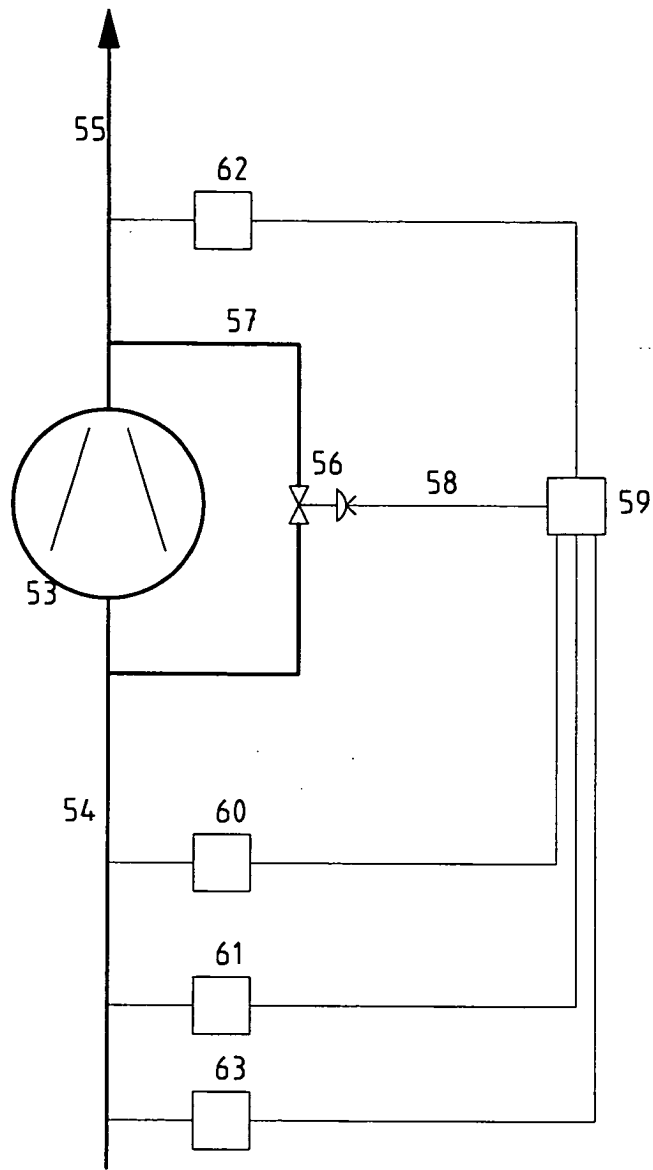


Fig. 6

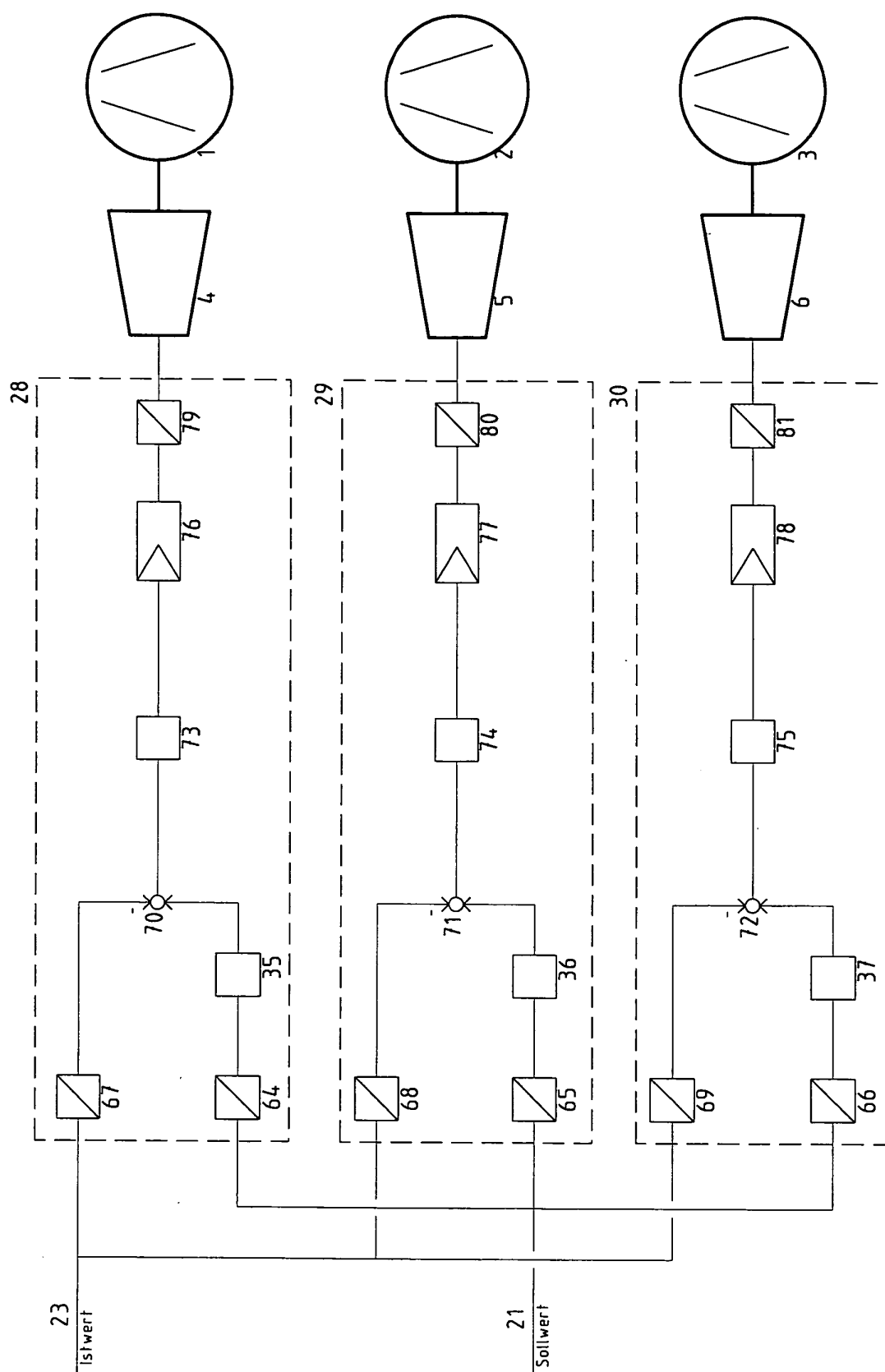


Fig. 7

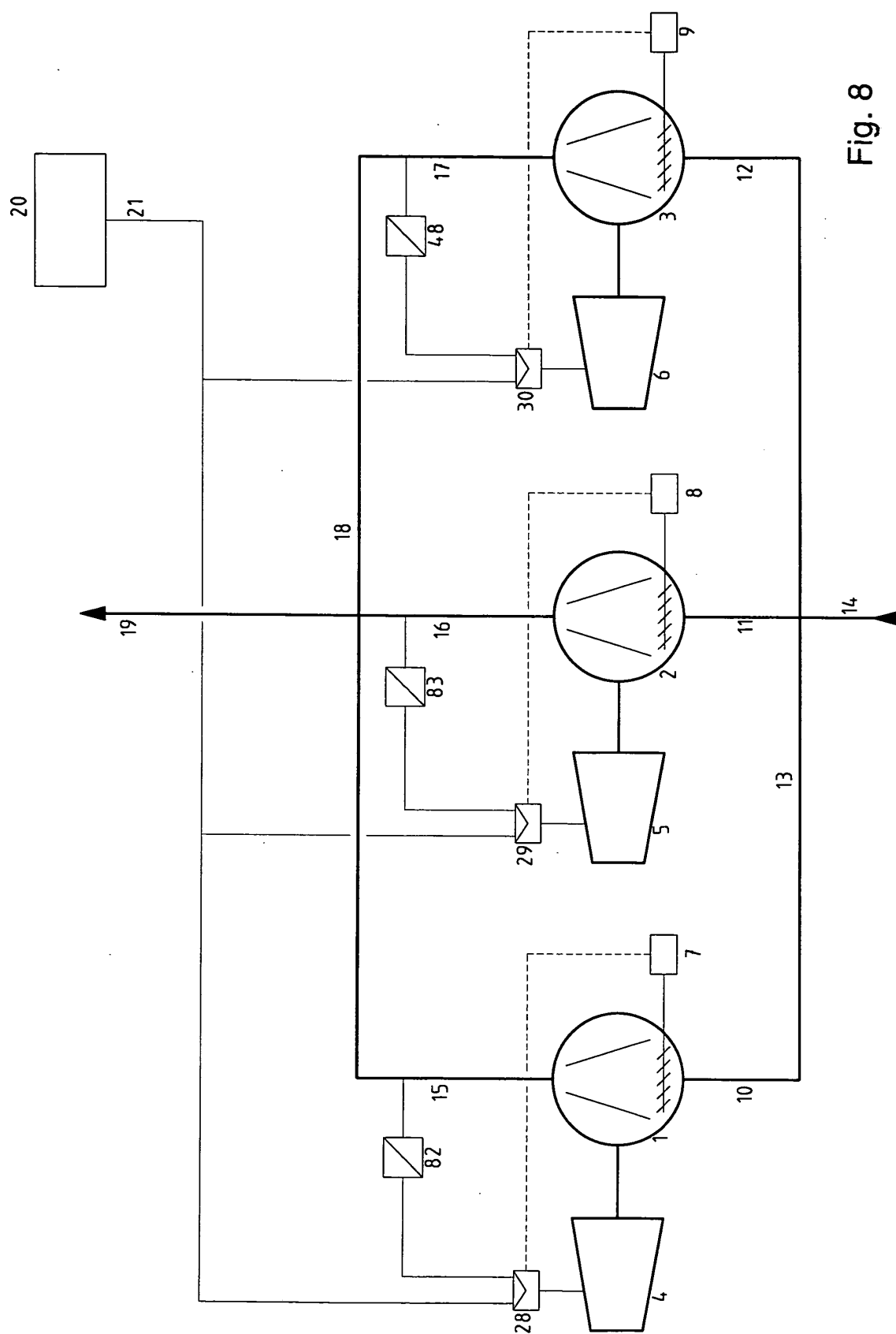


Fig. 8

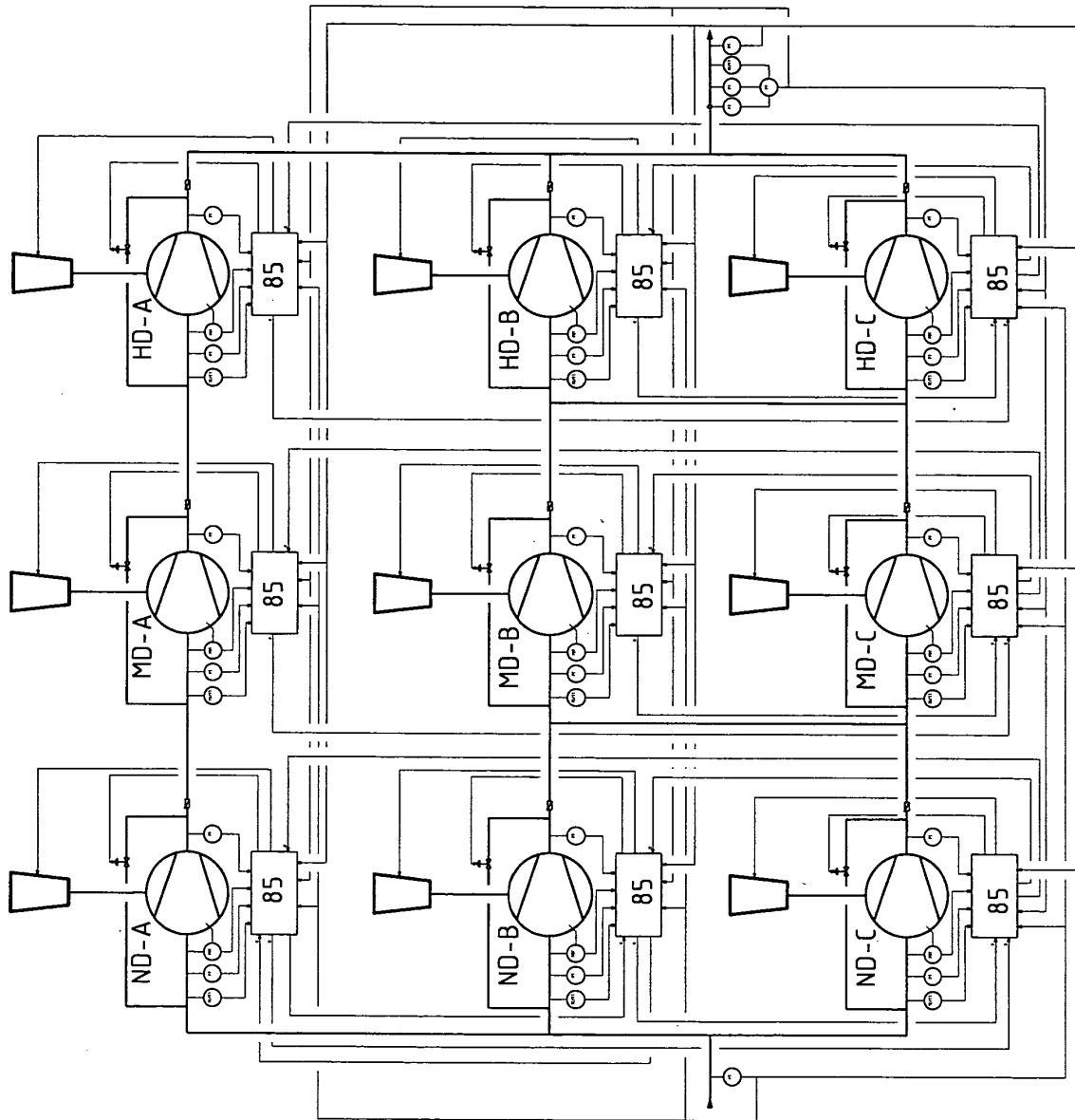


Fig. 9

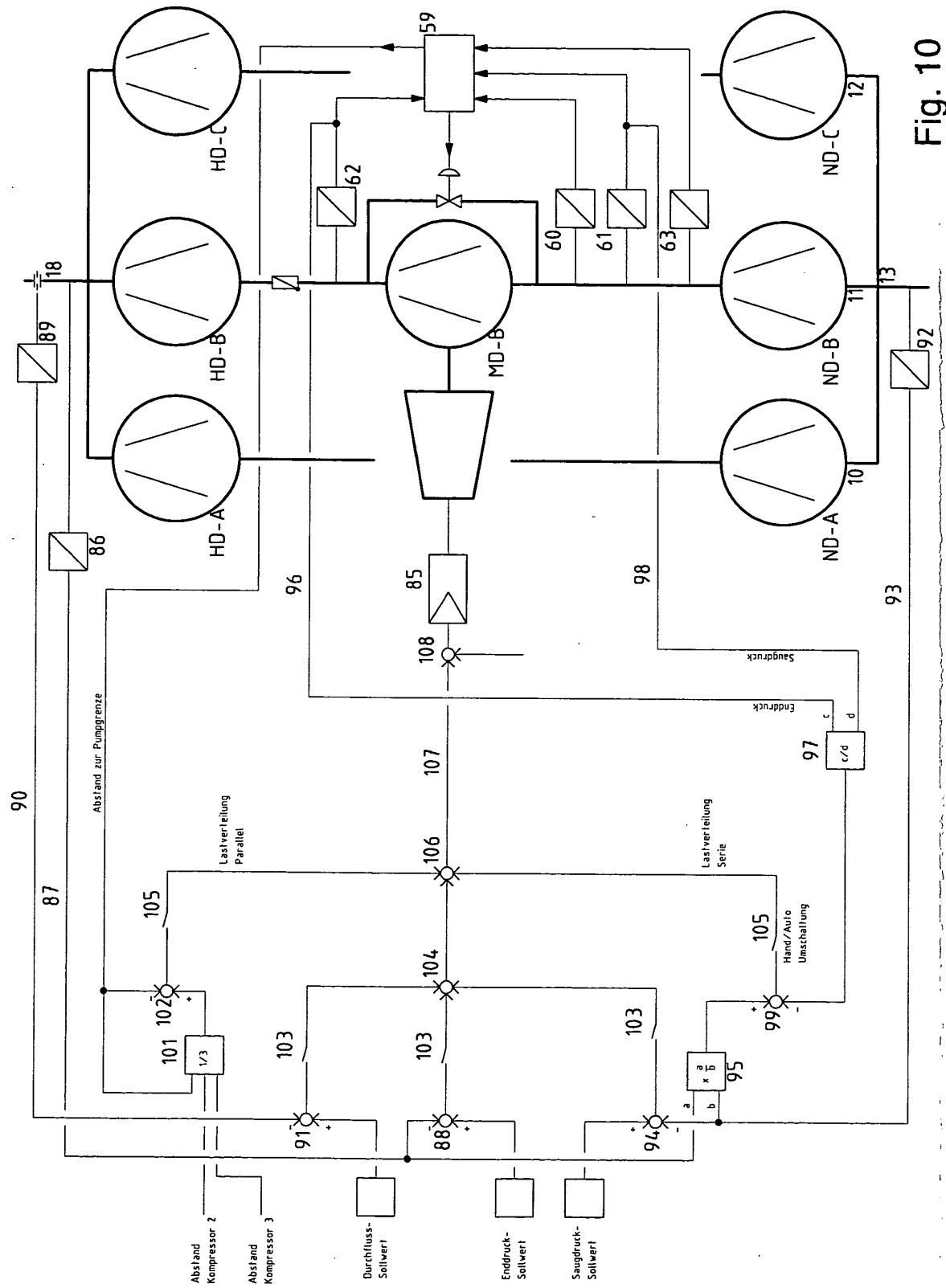


Fig. 10

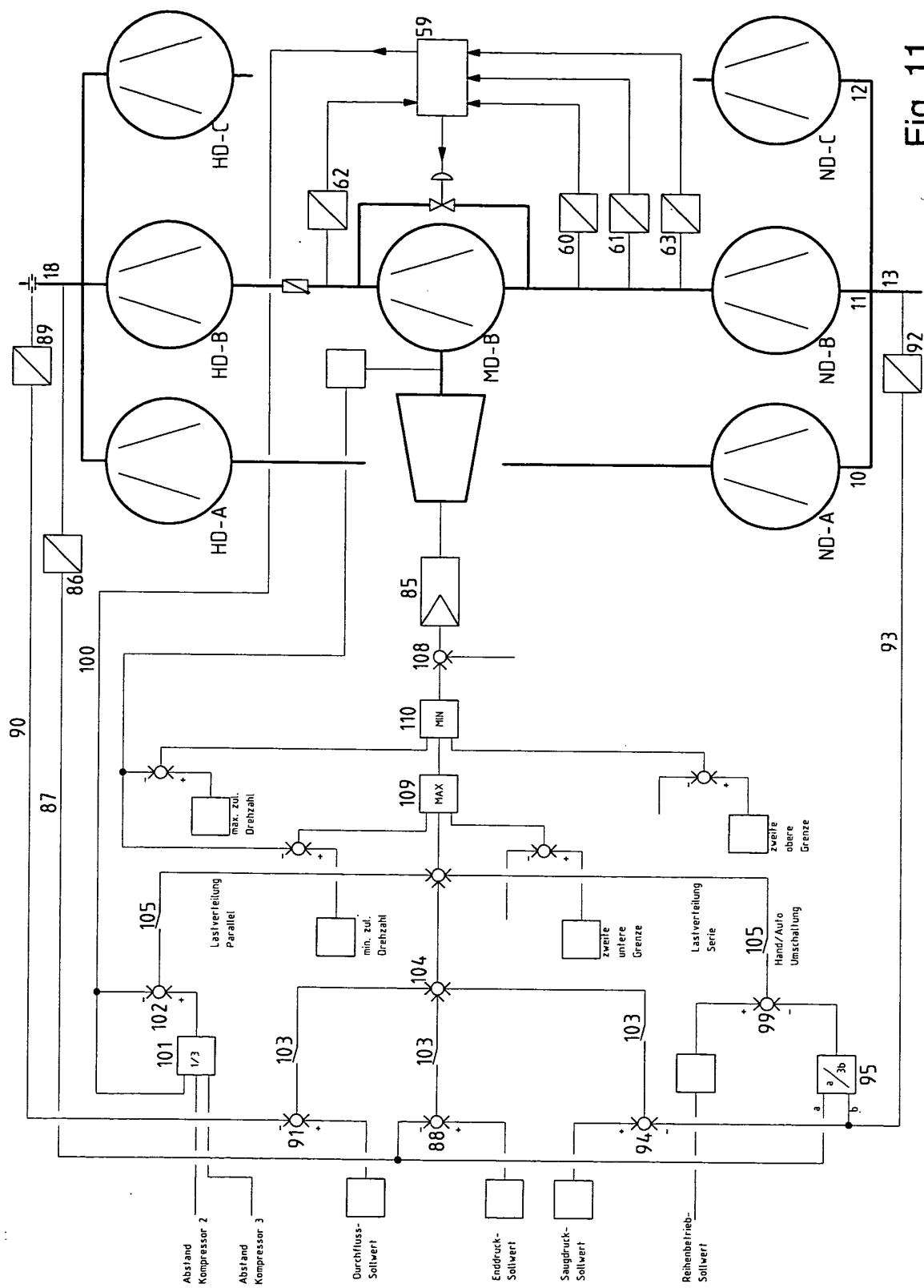


Fig. 11