



(21) WP F 04 B / 304 706 4 (22) 07.07.87 (44) 16.11.88

(71) Technische Universität Dresden, Direktorat Forschung, Mommsenstraße 13, Dresden, 8027, DD
 (72) Paul, Wolfram, Dr.-Ing.; Schade, Klaus, Prof. Dr. sc. techn.; Hügl, Mario, Dipl.-Ing.; Fromm, Burkhard, Dr.-Ing. Albert, Matthias, Dipl.-Ing., DD

(54) Vorrichtung zur Druckregelung im Feinvakuumbereich

(55) Wälzkolbenpumpe, Vorpumpe, Saugvermögen, Druckregelbereich, Strömungswiderstand, Frequenzumrichter, Digitalregler, Arbeitsdruckbereich, Gasdurchsatz, Regelbereich, Ölrückströmung
 (57) Die Erfindung betrifft eine mit übergeordneten automatischen Steuereinrichtungen kompatible Vorrichtung zur Veränderung des wirksamen Saugvermögens an und zur Regelung des dynamischen Totaldrucks in einer Vakuumkammer, insbesondere wenn ein stabiles Regelverhalten auch bei prozeß- bzw. zeitabhängiger Sollwertvorgabe gefordert wird. Sie findet Anwendung bei der Abscheidung und Abtragung von Metall-, Halbleiter- und Isolatorschichten. Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Feinvakuumsysteme, bei denen das Prinzip der drehzahlgestellten Wälzkolbenpumpe zur Beeinflussung des wirksamen Saugvermögens ausgenutzt wird, dahingehend zu verbessern, daß sie ohne wesentliche Einschränkungen des Stellbereiches an das jeweils vom technologischen Prozeß geforderte mittlere effektive Saugvermögen angepaßt werden können. Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß zwischen der Vorpumpe und der drehzahlgesteuerten Wälzkolbenpumpe ein arbeitspunktbestimmender veränderbarer Strömungswiderstand angeordnet ist. Es ist ferner zweckmäßig, an Stelle des Strömungswiderstandes eine zweite Wälzkolbenpumpe einzusetzen, die ebenfalls über einen zweiten Frequenzumrichter drehzahlvariabel angesteuert wird. Die Erfindung ist aus Fig. 1 ersichtlich.

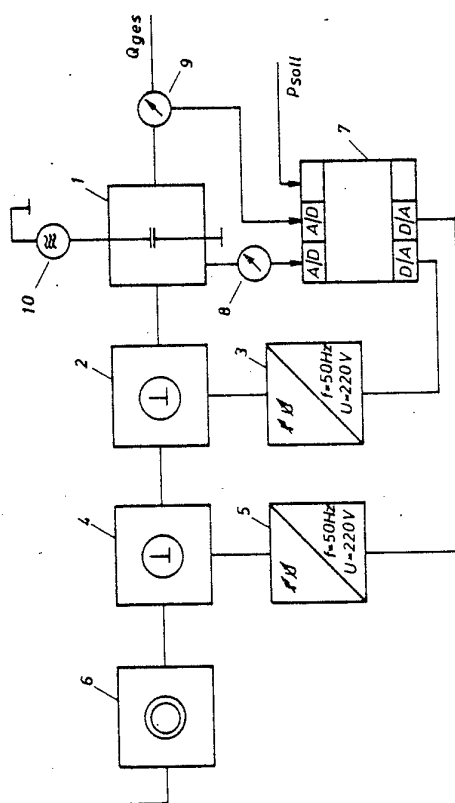


Fig. 1

Patentansprüche:

1. Vorrichtung zur Druckregelung im Feinvakuumbereich zur Regelung des dynamischen Totaldrucks in einer Vakuumkammer, bestehend aus einer über Frequenzumrichter von einem Regler angesteuerten Wälzkolbenpumpe, einem Druckmeßgerät und einer Vorpumpe, **dadurch gekennzeichnet**, daß ein arbeitspunktbestimmender veränderbarer Strömungswiderstand zwischen Vorpumpe und Wälzkolbenpumpe angeordnet ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Strömungswiderstand kontinuierlich veränderbar, bis in den negativen Bereich, in Form einer zweiten oder mehrerer in Reihe geschalteter Wälzkolbenpumpen ausgeführt und über einen weiteren Frequenzumrichter ansteuerbar ist.
3. Vorrichtung nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Ansteuerung des in Form einer drehzahlgestellten Wälzkolbenpumpe zusätzlich vorliegenden Stellgliedes gleichzeitig mit der Ansteuerung der Wälzkolbenpumpe 1 genau aufeinander abgestimmt mittels eines Digitalreglers erfolgt.

Hierzu 2 Seiten Zeichnungen

Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft eine mit übergeordneten automatischen Steuereinrichtungen kompatible Vorrichtung zur Veränderung des wirksamen Saugvermögens an und zur Regelung des dynamischen Totaldrucks in einer Vakuumkammer, insbesondere wenn ein stabiles Regelverhalten auch bei prozeß- bzw. zeitabhängiger Sollwertvorgabe gefordert wird. Sie findet Anwendung bei der Abscheidung und Abtragung von Metall-, Halbleiter- und Isolatorschichten einschließlich der Werkstückvorbehandlung im Vakuum oder in Niederdruckplasmen, vor allem bei Prozessen, deren Kenngrößen stark vom Totaldruck während der Bearbeitung der Werkstücke abhängig sind.

Charakteristik der bekannten technischen Lösungen

Es ist bekannt, daß zumindest ein Teil der strukturellen kompositionellen, optischen, chemischen und elektrischen Eigenschaften der durch Niederdruck-Verfahren (Katodenzerstäubung, Bedampfung, LPCVD, PCVD) hergestellten, zumeist amorphen oder polykristallinen Halbleiter- bzw. Isolatorschichten außer von der Prozeßgaszusammensetzung und der Substrattemperatur in erheblichem Maße auch vom Totaldruck im Reaktor abhängen. Weiterhin ist die Abscheiderate eine Funktion des Arbeitsdrucks, und im Falle von plasmagestützten Verfahren wird die umgesetzte Wirkleistung stark vom Totaldruck beeinflusst. Ebenso wird die Ätzcharakteristik beim Plasmaätzen und Ionenätzen stark vom Totaldruck bestimmt. Demzufolge werden Vakuumanlagen zur reproduzierbaren Herstellung und Abtragung von Schichten mit Einrichtungen zur Konstanthaltung des Arbeitsdrucks ausgerüstet. Bekannt sind Verfahren, die sich in 2 Kategorien einteilen lassen:

Die Druckregelung durch Veränderung des Gasdurchsatzes (Prozeß- oder Verdünnungsgase) mittels eines mit einem Druckmesser über einen elektronischen Regler gekoppelten Einlaßventils (Upstream-Regelung) wird vorrangig für Inertgas-Sputterprozesse angewandt, bei denen der Gasdurchsatz eine untergeordnete Rolle spielt. Durch die diesem Verfahren eigenen Nachteile wie der sich ständig ändernde Gasdurchsatz (d. h. Änderung der Verweilzeit der Gasmoleküle im Arbeitsraum) sowie die Änderung der Partialdruckverhältnisse wird von Anwendungen bei reaktiven Prozessen abgesehen (z. B. Chapman, B. N.: J. Appl. Phys. 51 [1980], 3608).

Druckregleinrichtungen, deren Stellglieder das effektive Saugvermögen am Rezipienten beeinflussen (Downstream-Regelung) ermöglichen dagegen eine von der Einspeisung weitestgehend unabhängige Regelung des Arbeitsdrucks im Rezipienten.

Bekannt sind die Saugleistungsbeeinflussung mittels Drosselventil und durch Einspeisung eines Gasballastes (Clark, W. R., u. a.: Solid State Technology 25 [1982], 3, 105; Duval, P.: in Proc. 8. Intern. vacuum congress, Cannes 1980, 34), die unabhängig vom eingesetzten Pumpentyp sind, aber folgende entscheidende Nachteile besitzen:

Das Drosselventil besitzt eine stark nichtlineare Übertragungsfunktion, wodurch die Erlangung eines stabilen Regelverhaltens über den gesamten, an sich großen Dynamikbereich meist nicht möglich ist. Es stellt weiterhin ein zusätzliches mechanisches Element im Vakuumzweig dar, welches die Leckrate erhöhen kann und bei reaktiven Prozeßgasen eine geringe Standzeit infolge Korrosion und Ablagerungen besitzt (Duval, P.: in Proc. 8. Intern. vacuum congress, Cannes 1980, 34). Bei einer Gasballasteinspeisung in den Saugstutzen der verwendeten Vakuumpumpe ist das Ballastgas, zumeist Stickstoff, sowie dessen sämtliche Verunreinigungen im Rezipienten nachweisbar (Rückdiffusion), wodurch eine ständige Änderung der Partialdruckverhältnisse ähnlich den Verhältnissen bei der Upstream-Regelung auftritt. Weiterhin ist der hohe Ballastgasverbrauch ein Nachteil dieses Prinzips.

Der Trend bei Schichtabschneidverfahren zu höheren Gasdurchsätzen zwecks Erhöhung der Abscheideraten und der Schichtqualitäten bei Verringerung des Arbeitsdrucks bis auf Werte kleiner 20 Pa erfordern den Einsatz von Wälzkolbenpumpen (z. B. Gorinas, G.: in Proc. 8. Intern. vacuum congress, Cannes 1980, 34). Da das Saugvermögen dieser Pumpen direkt von der Drehzahl abhängig ist, ergibt sich bei Verwendung eines Frequenzumrichters ein Stellglied mit nahezu linearer Übertragungsfunktion im gesamten Arbeitsbereich (Clark, W. R., u. a.: Solid State Technology 25 [1982], 3, 105; Duval, P.: in Proc. 8. Intern. vacuum congress, Cannes 1980, 34).

Die bekannten für die Ansteuerung o. g. Stellglieder in Abhängigkeit des Druckmeßwertes verwendeten Regler sind analoge PI- bzw. PID-Regler (Firmenschrift Balzers AG: Komponentenkatalog 86/88, Firmenschrift Leybold-Heraeus 173.13.1 12/85), bei

denen die Regelparameter Verstärkung, Nachstell- und Vorhaltezeit an den Prozeß durch „probieren“ von Hand angepaßt werden müssen. Da das Gasvolumen in der Arbeitskammer als Element des Regelkreises nichtlineares Verhalten zeigt — die dominierende Zeitkonstante der Übertragungsfunktion $\tau_R = V/S_{eff}(p)$ verändert sich mit dem Arbeitsdruck — realisieren o. g. Regler mit starren Regelparametern daher nur in einem sehr kleinen Druckbereich optimales Regelverhalten (Führungsverhalten, Störverhalten).

Die bekannten Druckregelsysteme sind daher nicht geeignet für Prozesse, bei denen mit einer sich während des Prozesses ändernden Sollwertvorgabe für den Reaktordruck gearbeitet werden muß, beispielsweise bei

Beeinflussung der Schichteigenschaften durch zeit- bzw. von einem direkt aus dem Bearbeitungsprozeß gewonnenen Meßsignal gesteuerte Arbeitsdruckänderung oder der Abscheidung von Schichtfolgen, wobei für die Herstellung der Einzelschichten jeweils unterschiedliche, sich schnell stabilisierende Arbeitsdrücke benötigt werden.

Ein wesentlicher Nachteil der bekannten Lösungen ist der geringe Dynamikbereich für die mittels drehzahlgesteuerter Wälzkolbenpumpe geregelten Arbeitsdruck an sich, da das Verhältnis zwischen maximaler und minimaler Drehzahl aus mechanischen Gründen auf Werte im Bereich von 7 bis 12 begrenzt ist (Heinen, R., u. a.: Vakuum-Technik 35 [1986], 231). Die volle Ausnutzung dieses Dynamikbereiches für die Regelung des Totaldrucks in der Arbeitskammer wird darüber hinaus noch durch die, auf Grund der nicht beliebig fein abstufbaren Typenreihen der Wälzkolbenpumpen, meist vorliegenden „Fehlanspassung“ zwischen Saugvermögensbedarf des Prozesses bei Normalbedingungen und Pumpsystem eingeschränkt.

Ziel der Erfindung

Ziel der Erfindung ist es, eine Vorrichtung zur Regelung des Totaldrucks im Feinvakuumbereich mit an den Vakuumprozeß anpaßbarem effektivem Saugvermögen bei möglichst erweitertem Regelbereich und großer Zuverlässigkeit anzugeben.

Darlegung des Wesens der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Feinvakuumsysteme, bei denen das Prinzip der drehzahlgestellten Wälzkolbenpumpe zur Beeinflussung des wirksamen Saugvermögens ausgenutzt wird, dahingehend zu verbessern, daß sie ohne wesentliche Einschränkungen des Stellbereiches an das jeweils vom technologischen Prozeß geforderte mittlere effektive Saugvermögen angepaßt werden können bzw. einen vergrößerten Druckregelbereich bei gleichbleibenden optimalen Regeleigenschaften und hoher Zuverlässigkeit aufweisen. Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß zwischen der Vorpumpe und der drehzahlgesteuerten Wälzkolbenpumpe ein arbeitspunktbestimmender veränderbarer Strömungswiderstand angeordnet ist. Es ist ferner zweckmäßig, an Stelle des Strömungswiderstandes eine zweite Wälzkolbenpumpe einzusetzen, die ebenfalls über einen zweiten Frequenzumrichter drehzahlvariabel angesteuert wird. Dadurch wird sowohl eine Erhöhung, als auch eine Absenkung des effektiven Saugvermögens des Gesamtsystems gegenüber den bisherigen Lösungen möglich. Mittels eines Digitalreglers erfolgt die Ansteuerung des in Form einer drehzahlgestellten Wälzkolbenpumpe zusätzlich vorliegenden Stellgliedes mit der Ansteuerung der Wälzkolbenpumpe 1 genau aufeinander abgestimmt.

Durch die gleichzeitige Ausnutzung der Abhängigkeit des Saugvermögens einer Wälzkolbenpumpe von ihrer Drehzahl und dem Saugvermögen der Vorstufe ist es möglich, eine stetige Änderung des Saugvermögens in einem bedeutend erweiterten Bereich zu realisieren. Der Arbeitsdruckbereich ist bei, für die Funktion der Vorrichtung nicht notwendigem, konstantem Gasdurchsatz im Vergleich zu den bereits bekannten Lösungen auf der Basis der Drehzahlvariation von Wälzkolbenpumpen wesentlich vergrößert. Der Digitalregler realisiert weiterhin adaptives Verhalten des Regelkreises, wodurch die Regeleigenschaften über den gesamten Druckbereich optimal sind und somit schnelle Druckänderungen sowie deren Ausnutzung für die gezielte Beeinflussung des vakuumtechnologischen Prozesses möglich sind. Das vorgestellte Pumpensystem besitzt eine wesentlich verringerte Ölrückströmung, besonders in dem Arbeitsbereich, in dem die Wälzkolbenpumpe der bisherigen Lösungen mit nur 3 bis 5 % der Nenndrehzahl betrieben werden müssen.

Ausführungsbeispiel

Die Erfindung wird anhand eines Ausführungsbeispiels sowie anhand von einer Zeichnung und einem Diagramm näher erläutert.

Dabei zeigen:

Fig. 1: den prinzipiellen Aufbau des Regelkreises bei Verwendung zweier Wälzkolbenpumpen in Reihenschaltung

Fig. 2: das erreichte effektive Saugvermögen am Rezipienten in Abhängigkeit vom Arbeitsdruck im Rezipienten bei einer Auswahl von Kombinationen der Ansteuerfrequenzen für die beiden Wälzkolbenpumpen.

Das Ausführungsbeispiel beschreibt die Vorrichtung zur Regelung des Totaldrucks im Feinvakuumbereich im Einsatz an einer Anlage zur plasmachemischen Abscheidung (PCVD) von Siliziumschichten.

Gemäß Fig. 1 besteht die Vorrichtung aus zwei in ihrer Saugleistung abgestuften und über die Frequenzumrichter 3,5 vom Mikrorechnerregler 7 angesteuerten Wälzkolbenpumpen 2,4, die in Reihenschaltung direkt verbunden und über eine Vakuumleitung mit einem Saugvermögenverlust kleiner 15 % an den Rezipienten 1 (PVCD-Reaktor) angeflanscht sind. Der Regelkreis wird durch das Meßglied 8 für den Arbeitsdruck im Rezipienten geschlossen.

Die Möglichkeit der Einbeziehung weiterer Meßgrößen zur Optimierung des Regelverhaltens ist am Beispiel der Messung des eingespeisten Prozeßgasstromes $\dot{Q}_{Gas}$ (Druckflußmesser 9) dargestellt, aber für die Funktion der Vorrichtung nicht zwingend notwendig.

Die Wälzkolbenpumpen werden entsprechend den typischen Abscheideparametern bei der plasmachemischen Zersetzung von Monosilan (Gasdurchsatz $\dot{Q}_{\text{Gas}} = 0,1-0,5 \text{ l/min}$, Arbeitsdruck $p = 20-150 \text{ Pa}$) in der Abstufung Nennsaugvermögen, Wälzkolbenpumpe A: $600 \text{ m}^3/\text{h}$, Nennsaugvermögen Wälzkolbenpumpe B: $100 \text{ m}^3/\text{h}$ eingesetzt. Als Vorpumpe 6 kommt eine Drehschieberpumpe mit einem Nennsaugvermögen von $15 \text{ m}^3/\text{h}$ zur Anwendung. Der HF-Generator stellt die erforderliche Leistung zur Aufrechterhaltung des für die Zersetzung des Silans erforderlichen Plasmas bereit.

Die für die zu erreichenden Schichteigenschaften erforderlichen technologischen Parameter, wie z. B. Gasdurchsatz, Substrattemperatur, werden eingestellt und der gewünschte Arbeitsdruck der Vorrichtung vorgegeben. In Abhängigkeit von den aktuellen vakuumtechnischen Bedingungen im Rezipienten ermittelt der Digitalregler die Regelkenngrößen, und der Druck wird in kürzestmöglicher Zeit bei optimalem Übergangsverhalten in weiten Grenzen unabhängig vom Gasdurchsatz und der Größe des Drucksollwertes eingeregelt.

Der Arbeitsbereich der hier vorgestellten Kombinationen ist aus Fig. 2 ersichtlich. Die Darstellung zeigt für eine Auswahl aus der Vielfalt der Ansteuermöglichkeiten der Wälzkolbenpumpen das am Rezipienten effektiv wirksame Saugvermögen in Abhängigkeit vom Arbeitsdruck.

Das effektive Saugvermögen und damit die Verweilzeit der Reaktanten in der Reaktionszone ist mittels der Vorrichtung zur Druckregelung sowohl bei stabilisiertem Druck als auch bei konstant gehaltenem Gasdurchsatz etwa im Bereich von 20% bis 500% des dimensionierten Mittelwertes von 20 l/s entsprechend den technologischen Forderungen zur Erzielung optimaler Schichteigenschaften frei wählbar bzw. während des Prozeßablaufs veränderbar (Dynamikbereich). Bei einem stabilisierten

Solldruck von 50 Pa entspricht das einer Variations- bzw. Schwankungsbreite des Gasdurchsatzes von $200 \text{ bis } 5000 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$.

Bei konstant gehaltenem Gasdurchsatz von z. B. $1000 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$ ist eine Änderung des Arbeitsdrucks im Bereich von $10 \text{ bis } 100 \text{ Pa}$ möglich.

Durch das vom Digitalregler realisierte adaptive Verhalten werden nahezu über den gesamten Druckbereich Regelzeitkonstanten erreicht, die nur wenig über der sich aus dem Quotienten des Rezipientenvolumens und dem effektiven Saugvermögen ergebenden bestimmenden Zeitkonstante des Systems ($\tau_R = V_{\text{Rez}}/S_{\text{eff}}$) liegen, wobei das Übergangsverhalten durch einmaliges maximal 10%iges Überschwingen gekennzeichnet ist (Optimales Regelverhalten).

Durch die o. g. Vorteile ist die Vorrichtung vorzugsweise für die Herstellung von Metall-, Halbleiter- bzw. Isolatorstrukturen bzw. Mehrschichtsystemen, deren Abscheidemechanismen bzw. deren Schichteigenschaften vom Druck bzw. Gasdurchsatz abhängig sind und durch Variation des Arbeitsdrucks bzw. des Gasdurchsatzes definiert beeinflusst werden, geeignet. Die weiteren Vorteile der Vorrichtung bestehen in der vollständigen Kompatibilität des Druckregelsystems mit mittels Rechner gesteuerten Vakuumanlagen und in der leichten Nachrüstbarkeit an vorhandenen Vakuumanlagen, im Falle einer oder mehrerer vorhandener Wälzkolbenpumpen ohne zusätzlichen Einbau von Bauelementen in das Vakuumsystem.

-1787- 145040

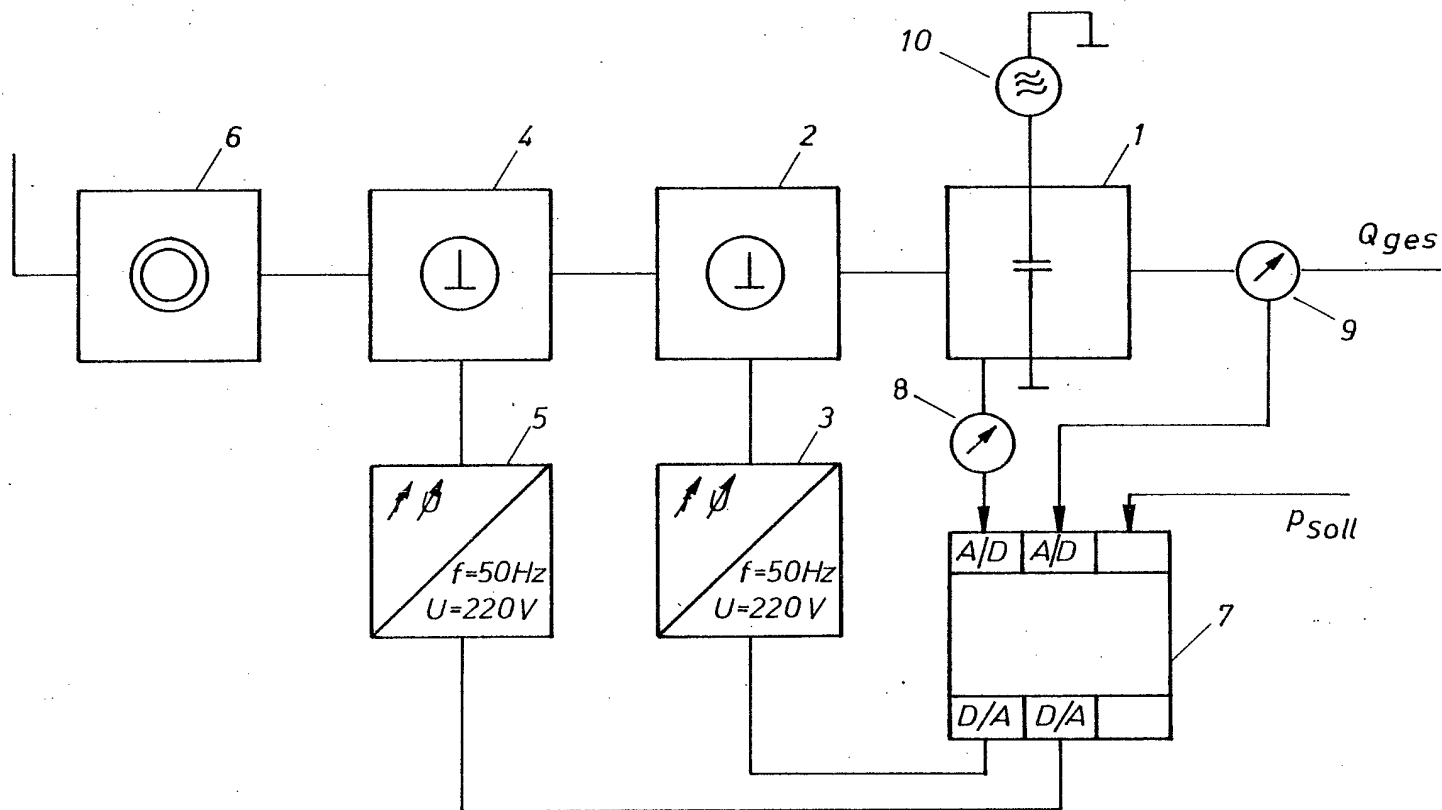


Fig.1

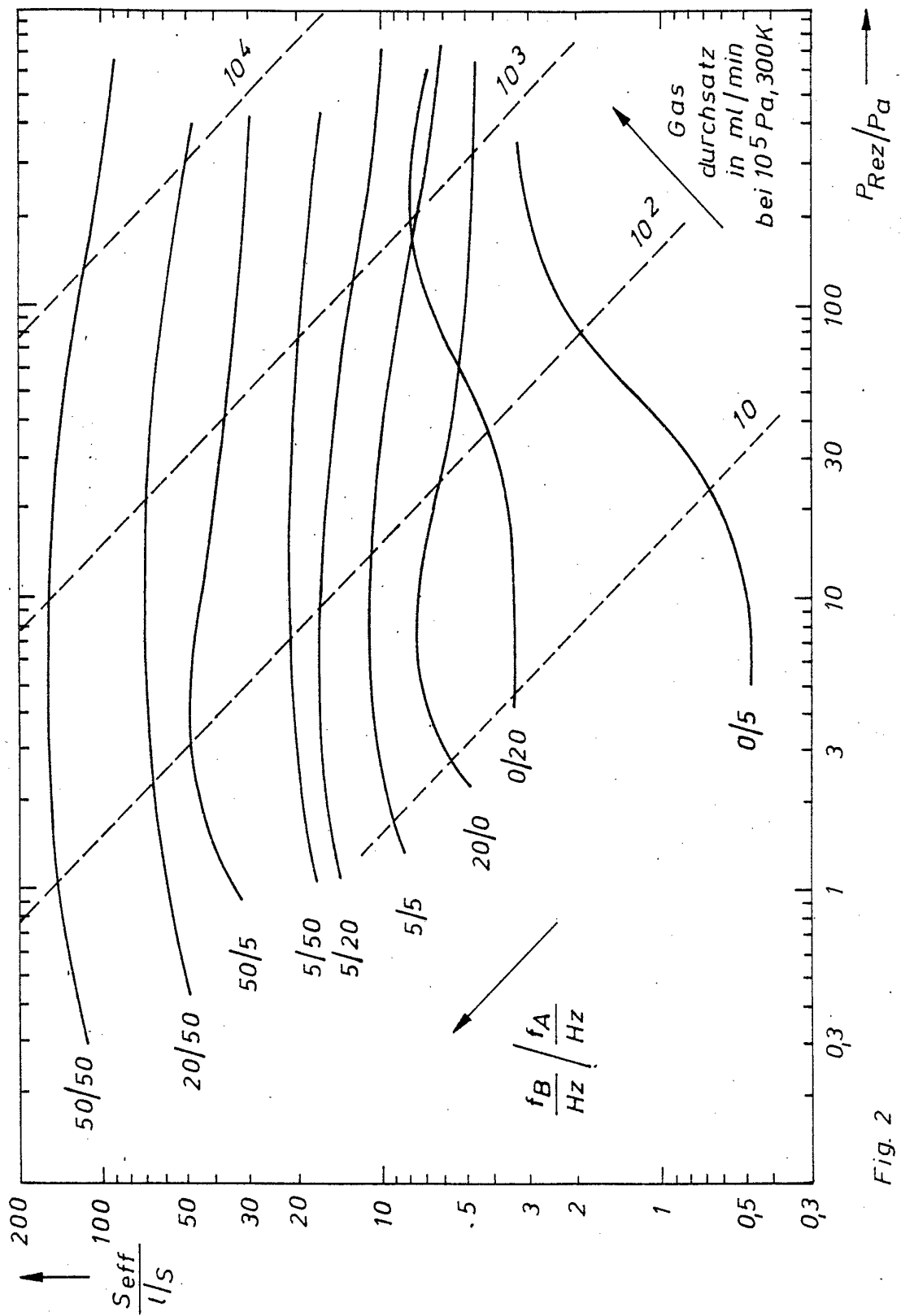


Fig. 2