(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 2 664 804 A2**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
**20.11.2013 Patentblatt 2013/47**

(51) Int Cl.:
***F15B 11/05*** *(2006.01)* ***F04B 49/00*** *(2006.01)*

(21) Anmeldenummer: **13002058.9**

(22) Anmeldetag: **19.04.2013**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR**
Benannte Erstreckungsstaaten:
**BA ME**

(30) Priorität: **15.05.2012 DE 102012009729**

(71) Anmelder: **ROBERT BOSCH GMBH**
**70442 Stuttgart (DE)**

(72) Erfinder:
- **Schmidt, Stefan**
  **97816 Lohr am Main (DE)**
- **Österle, Matthias**
  **72285 Pfalzgrafenweiler (DE)**
- **Nordt, Friedemann**
  **72184 Eutingen (DE)**
- **Springmann, Rolf**
  **72172 Sulz-Hopfau (DE)**
- **Duerr, Michael**
  **72160 Horb (DE)**

(74) Vertreter: **Wiesmann, Stephan**
**Bosch Rexroth AG**
**DC/IPR**
**Zum Eisengießer 1**
**97816 Lohr am Main (DE)**

(54) **Druck-Förderstromregler, Verstelleinheit für eine verstellbare hydraulische Verdrängermaschine mit einem Druck-Förderstromregler und Verfahren zum Regeln einer derartigen Verstelleinheit**

(57) Offenbart ist eine Verstellstelleinheit (3) für eine verstellbare hydraulische Verdrängermaschine (1) mit einem Druck-Förderstromregler. Die Verstelleinheit hat zumindest einen Stellzylinder (2) zum Verstellen eines Hubraums der Verdrängermaschine (1). Der Stellzylinder wird über Schaltventile (20, 22, 28) angesteuert.

EP 2 664 804 A2

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung geht aus von einem Druck-Förderstromregler zum Verstellen einer Verstelleinheit einer verstellbaren hydraulischen Verdrängermaschine. Des Weiteren geht die Erfindung von einer Verstelleinheit für eine derartige Verdrängermaschine mit einem derartigen Druck-Förderstromregler und von einem Verfahren zum Regeln der Verstelleinheit aus.

**[0002]** In der DE 10 2010 048 070 A1 ist eine verstellbare Verdrängermaschine in Form einer Hydropumpe offenbart. Deren Schwenkwinkel kann über zwei Stellzylinder verändert werden. Zum Verstellen des einen Stellzylinders und somit zum Verstellen des Schwenkwinkels der Verdrängermaschine, ist ein Druck-Förderstromregler vorgesehen. Dieser hat zwei Proportionalventile, über die ein Zylinderraum des Stellzylinders mit einer an der Verdrängermaschine angeschlossenen Druckleitung oder mit einer Tankleitung verbindbar ist. Die Proportionalventile werden hydraulisch betätigt.

**[0003]** Nachteilig bei einem derartigen Druck-Förderstromregler ist, dass die Proportionalventile vergleichsweise kostenintensiv sind und eine geringe Robustheit aufweisen. Des Weiteren ist eine Leckage der Proportionalventile vergleichsweise hoch, was zu einem Wirkungsgradverlust der Verdrängermaschine führt.

**[0004]** Dem gegenüber liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde einen Druck-Förderstromregler zum Verstellen einer Verstelleinheit zu schaffen, der die oben genannten Nachteile beseitigt. Eine weitere Aufgabe der Erfindung ist es eine Verstelleinheit für eine verstellbare hydraulische Verdrängermaschine mit einem derartigen Druck-Förderstromregler zu schaffen, die ebenfalls die genannten Nachteile beseitigt. Außerdem ist es eine Aufgabe der Erfindung ein Verfahren zum Regeln einer derartigen Verstelleinheit vorzusehen, mit dem auf äußerst einfache Weise eine Verdrängermaschine gesteuert werden kann.

**[0005]** Die Aufgabe hinsichtlich des Druck-Förderstromreglers wird gelöst gemäß den Merkmalen des Patentanspruchs 1, hinsichtlich der Verstelleinheit gemäß den Merkmalen des Patentanspruchs 6 und hinsichtlich dem Verfahren gemäß den Merkmalen des Patentanspruchs 12.

**[0006]** Sonstige vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand weiterer Unteransprüche.

**[0007]** Erfindungsgemäß hat ein Druck-Förderstromregler zum Verstellen einer Verstelleinheit einer verstellbaren hydraulischen Verdrängermaschine ein Schaltventil zum Ansteuern der Verstelleinheit.

**[0008]** Diese Lösung hat den Vorteil, dass der Druck-Förderstromregler aufgrund des Schaltventils vergleichsweise kostengünstig ist, da ein Schaltventil vergleichsweise geringe Fertigungskosten aufweist und vorrichtungstechnisch einfach aufgebaut ist. Eine Leckage des Druck-Förderstromreglers ist ebenfalls aufgrund des Schaltventils vergleichsweise gering. Des Weiteren weisen Schaltventile eine sehr geringe Stellzeit auf, weswegen der Druck-Förderstromregler ebenfalls eine sehr kurze Stellzeit hat. Durch das robuste Schaltventil hat der Druck-Förderstromregler eine hohe Schockfestigkeit. Aufgrund einer geringen Anfälligkeit der Schaltventile gegenüber verschmutzter Hydraulikflüssigkeit ist ein Wartungsaufwand des Druck-Förderstromreglers gering. Eine Veränderung des Schaltverhaltens der Schaltventile aufgrund von Temperaturänderungen ist ebenfalls im Vergleich zu Proportionalventilen sehr gering, wodurch der Druck-Förderstromregler bei unterschiedlichsten Temperaturen sicher eingesetzt werden kann. Schaltventile sind auch sehr robust gegenüber elektromagnetischen Störungen. Ferner ist es möglich, die Schaltventile des Druck-Förderstromreglers direkt über eine digitale Steuereinheit bzw. einen Mobilkontroller anzusteuern, im Gegensatz zum Stand der Technik, wo zur Ansteuerung der Proportionalventile ein Digital/Analog-Wandler notwendig ist.

**[0009]** Bei den Schaltventilen handelt es sich beispielsweise um 2/2-Wegeventile, über die eine Druckmittelverbindung auf- und zusteuerbar ist. Das Schaltventil kann als Schieberventil oder bevorzugterweise als praktisch leckagefreies Sitzventil ausgestaltet sein. Vorzugsweise ist ein Ventilkörper der Schaltventile in Richtung einer Schließposition mit einer Federkraft einer Ventilfeder beaufschlagt und kann über einen elektromagnetischen Aktuator in Richtung einer Öffnungsposition mit einer Öffnungskraft beaufschlagt werden.

**[0010]** Das zumindest eine Schaltventil kann flexibel im Pulse-Width-Modulated-Modus (PWM) oder im Ballistischen Modus (BaM) eingesetzt werden. Somit können bei dem Schaltventil unterschiedliche Öffnungsquerschnitte vorgesehen werden.

**[0011]** In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist zumindest ein Schaltventil zum Steuern einer Verbindung zwischen der Verstelleinheit und einer Druckmittelquelle und zumindest ein Schaltventil zum Steuern einer Verbindung zwischen der Verstelleinheit und einer Druckmittelsenke vorgesehen. Hierdurch kann auf einfache Weise beispielsweise ein Stellzylinder der Verstelleinheit verstellt werden.

**[0012]** Die Schaltventile zum Steuern einer Druckmittelverbindung zwischen der Druckmittelquelle und der Verstelleinheit beziehungsweise der Druckmittelsenke und der Verstelleinheit können im Meter-In/Meter-Out-Modus (MIO) angesteuert werden.

**[0013]** Um eine Verbindung zwischen der Verstelleinheit und der Druckmittelquelle oder der Druckmittelsenke Pulse-Code-Modulated (PCM) zu steuern, sind zumindest zwei Schaltventile in einem Druckmittelströmungspfad zwischen der Verstelleinheit und der Druckmittelquelle und/oder zwischen der Verstelleinheit und der Druckmittelsenke vorgesehen. Die Schaltventile eines Druckmittelströmungspfads haben hierbei vorzugsweise unterschiedliche Nenngrößen, um diese eben im Pulse-Code-Modulated-Modus einzusetzen. Alternativ kann das größere Schaltventil beispielsweise zur

Grobverstellung des Stellzylinders der Verstelleinheit und das kleinere Schaltventil zur Feinverstellung des Stellzylinders eingesetzt werden.

**[0014]** Erfindungsgemäß hat eine Verstelleinheit für eine verstellbare hydraulische Verdrängermaschine einen erfindungsgemäßen Druck-Förderstromregler. Die Verstelleinheit hat hierbei zumindest einen Stellzylinder zum Verstellen eines Hubraums der Verdrängermaschine, insbesondere zum Einstellen eines Schwenkwinkels. Der Stellzylinder weist einen von einem Kolben begrenzten Zylinderraum auf, der zum Verschieben des Kolbens in Richtung des sich vergrößernden Zylinderraums über das Schaltventil des Druck-Förderstromreglers mit einem von einer Druckleitung der Verdrängermaschine abgegriffenen Druckmittel beschickbar ist und der zum Entlassen von Druckmittel aus dem Zylinderraum über ein weiteres Schaltventil mit der Druckmittelsenke verbindbar ist. Beispielsweise wird bei einer Verschiebung des Kolbens des Stellzylinders in Richtung des sich vergrößernden Zylinderraums ein Hubraum der Verdrängermaschine vergrößert und beim Verschieben in umgekehrter Richtung verkleinert.

**[0015]** Mit Vorteil wird der Kolben des Verstellzylinders über eine Stellfeder mit einer Federkraft in Richtung des sich verkleinernden Zylinderraums beaufschlagt. Es kann ein zweiter Stellzylinder vorgesehen sein, der einen einen Zylinderraum begrenzenden Kolben hat. Der Zylinderraum kann hierbei mit der Druckleitung der Verdrängermaschine verbunden sein. Der Kolben wirkt dann beispielsweise dem Kolben des ersten Stellzylinders entgegen. Bei der Verdrängermaschine kann es sich um eine Axialkolbenmaschine in Schrägscheibenbauweise handeln, wobei die Kolben der Stellzylinder dann an eine Schrägscheibe zum Steuern des Hubraums der Verdrängermaschine angreifen.

**[0016]** Zum Ansteuern der Verdrängermaschine ist beispielsweise einfach eine elektronische Steuereinheit vorgesehen, die die Schaltventile in Abhängigkeit eines Drucks, insbesondere in der Druckleitung der Verdrängermaschine, und/oder in Abhängigkeit eines Verschiebewegs des Kolbens des Stellzylinders oder eines Schwenkwinkels der Schrägscheibe steuert. Zum Messen des Drucks ist vorzugsweise ein Drucksensor vorgesehen, der diesen in der Druckleitung der Verdrängermaschine abgreift. Zum Messen des Verschiebewegs kann ein Wegaufnehmer eingesetzt werden, der einen Verschiebeweg des Kolbens des Stellzylinders misst.

**[0017]** Damit die Verstelleinheit auf einfache Weise auf plötzliche Druckspitzen in der Druckleitung reagieren kann, kann ein Überströmventil vorgesehen sein, das fluidisch parallel zum wenigsten einen zwischen der Druckleitung und dem Zylinderraum des Stellzylinders angeordneten Schaltventil angeordnet werden kann. Bei dem Überströmventil handelt es sich beispielsweise ein in Strömungsrichtung hin zum Zylinderraum sich öffnendes Rückschlagventil.

**[0018]** Zum Ansteuern der Verstelleinheit durch die Steuereinheit werden die Schaltventile beispielsweise einfach mit einer Dreipunktregelung geregelt. Die Schaltventile können hierbei druckabhängig geregelt werden, insbesondere in Abhängigkeit von einem Druck in der Druckleitung oder von einem Lastdruck. Denkbar ist auch, die Stellzylinder wegabhängig vom Verschiebeweg des Kolbens zu regeln.

**[0019]** Um eine Überhitzung eines Schaltventils zu vermeiden kann ein Schaltzyklus des Schaltventils ein vorbestimmtes Verhältnis von einer Einschalt- zu einer Ausschaltdauer aufweisen. D. h., das Schaltventil wird mit einer bestimmten Zeitspanne bestromt und ist mit einer sich daran anschließenden Zeitspanne unbestromt.

**[0020]** Zum einfachen Regeln mehrerer Schaltventile ist eine Schaltfrequenz von diesen gleich.

**[0021]** Eine Abtastung des Drucks und/oder des Verschiebewegs mit einer bestimmten Abtastfrequenz kann etwa synchron zu einer Ansteuerung der Schaltventile mit einer bestimmten Schaltfrequenz sein, was zu einer äußerst einfachen Regelung führt. Vorzugsweise beträgt die Abtastfrequenz ein Vielfaches der Schaltfrequenz oder entspricht der Schaltfrequenz. Durch die Schaltfrequenz wird ein Steuerimpuls an die Schaltventile nur in vorbestimmten Zeitabständen abgegeben.

**[0022]** Es ist auch denkbar, dass die Abtastfrequenz und die Schaltfrequenz nicht synchron verlaufen, wodurch ermöglicht ist, dass die Schaltfrequenz erst bei Bedarf getriggert wird, während eine Abtastung des Drucks und/oder des Verschiebewegs mit einer bestimmten Abtastfrequenz erfolgt.

**[0023]** Vorzugsweise ist die Abtastfrequenz größer als die Schaltfrequenz, was dazu führt, dass während der Bestromung des Schaltventils weiter der Druck und/oder der Verschiebeweg abgetastet wird und bei Bedarf eine Einschaltdauer des bestromten Ventils unterbrochen werden kann. Hierzu ist vorteilhaft, wenn die Einschaltdauer der Schaltventile während eines Schaltzyklus variabel ist. Das Schaltventil kann hierbei vorzeitig schließen, wenn beispielsweise der gemessene Druck dies erfordert.

**[0024]** In weiterer Ausgestaltung der Erfindung sind die Schaltzyklen der Schaltventile unabhängig zueinander, wodurch die Schaltventile somit unabhängig voneinander steuerbar sind und somit unabhängig voneinander schalten können.

**[0025]** Ein äußerst einfaches erfindungsgemäßes Verfahren zum Regeln einer erfindungsgemäßen Verstelleinheit weist folgende Schritte auf:

- Abtasten des Verschiebewegs des Kolbens des Stellzylinder und/oder des Drucks, insbesondere mit einer bestimmten Abtastfrequenz;
- Steuern der Schaltventile in Abhängigkeit des Verschiebewegs und/oder des Drucks, wobei die Steuerung insbesondere entsprechend der Dreipunktregelung erfolgt.

**[0026]** Im Folgenden werden bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung anhand schematischer Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

Figur 1 einen hydraulischen Schaltplan einer Verdrängermaschine mit einer erfindungsgemäßen Verstelleinheit gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel;
Figur 2 in einer schematischen Darstellung eine Dreipunktregelung der Verstelleinheit;
Figur 3 ein Blockschaltbild einer Reglerstruktur der erfindungsgemäßen Verstelleinheit;
Figur 4 einen geregelten Positionsverlauf eines Kolbens eines Stellzylinders der erfindungsgemäßen Verstelleinheit;
Figur 5 ein Blockschaltbild einer Reglerstruktur der erfindungsgemäßen Verstelleinheit;
Figur 6 bis 9 einen geregelten Druckverlauf der Verdrängermaschine;
Figur 10 schematisch ein Funktionsprinzip einer digitalen Druckregelung;
Figur 11 schematisch einen Stromverlauf einer Endstufe einer Steuereinheit;
Figur 12 schematisch Schaltzyklen eines Schaltventils;
Figur 13 ein Blockschaltbild einer Reglerstruktur der erfindungsgemäßen Verstelleinheit und
Figur 14 einen hydraulischen Schaltplan einer Verdrängermaschine mit einer erfindungsgemäßen Verstelleinheit gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel.

**[0027]** Gemäß Figur 1 ist ein hydraulischer Schaltplan mit einer verstellbaren Verdrängermaschine 1 dargestellt. Bei dieser kann es sich um eine Axial- oder Radialkolbenmaschine handeln, die als Hydropumpe oder Hydromotor einsetzbar ist.

**[0028]** Im Folgenden wird die Erfindung anhand einer verschwenkbaren Axialkolbenmaschine mit einem Schrägscheiben-Triebwerk erläutert. Zum Verschwenken der nicht dargestellten Schrägscheibe der Verdrängermaschine 1 ist ein Stellzylinder 2 vorgesehen. Dieser hat einen von einem Kolben 4 begrenzten Zylinderraum 6. Der Kolben ist über eine einseitige Kolbenstange 8 mit der nicht dargestellten Schrägscheibe der Verdrängermaschine 1 verbunden. Eine Verschiebung des Kolbens 4 in Richtung eines sich vergrößernden Zylinderraums 6 führt dazu, dass die Schrägscheibe in Richtung eines sich vergrößernden Hubraums der Verdrängermaschine 1 verschwenkt wird. Dagegen führt eine Verschiebung des Kolbens 4 in Richtung des sich verkleinernden Zylinderraums 6 zu einem Verschwenken der Schrägscheibe in Richtung eines sich verkleinernden Hubraums der Verdrängermaschine 1. Über eine Federkraft einer Rückstellfeder 10, die in einem von der Kolbenstange 8 durchsetzten Ringraum 12 des Stellzylinders 2 angeordnet ist, ist der Kolben 4 in Richtung des sich verkleinernden Zylinderraums 6 mit einer Federkraft beaufschlagt.

**[0029]** An die Verdrängermaschine 1 ist an einen Druckanschluss P eine Druckleitung 14 und an einen Tankanschluss T eine Tankleitung 16 angeschlossen. Die Druckleitung 14 ist mit einem nicht dargestellten hydraulischen Verbraucher verbunden. Die Tankleitung 16 mündet in einen Tank 18. Der Zylinderraum 6 ist mit der Tankleitung 14 über ein erstes und zweites Schaltventil 20 bzw. 22 verbindbar. Die Schaltventile 20 und 22 sind fluidisch parallel angeordnet und steuern jeweils eine Druckmittelverbindung zwischen dem Zylinderraum 6 und der Druckleitung 14. Das in der Figur 1 obere Schaltventil 20 weist hierbei eine größere Nenngröße als das untere Schaltventil 22 auf. Fluidisch gesehen zwischen dem kleineren Schaltventil 22 und dem Zylinderraum 6 ist eine Drossel 24 vorgesehen. Fluidisch parallel zu den Schaltventilen 20 und 22 ist ein Überströmventil 26 zwischen der Druckleitung 14 und dem Zylinderraum 6 angeordnet. Hierbei handelt es sich um ein in einer Druckmittelströmungsrichtung hin zum Zylinderraum 6 sich öffnendes Rückschlagventil. Zwischen dem Zylinderraum 6 und dem Tank 18 ist ein weiteres Schaltventil 28 vorgesehen, mit dem eine Druckmittelverbindung zwischen dem Zylinderraum 6 und dem Tank 18 auf-und zusteuerbar ist.

**[0030]** Die Schaltventile 20, 22 und 28 sind als 2/2-Wegeventile ausgebildet. Ein Ventilkörper der Schaltventile 20, 22 und 28 ist hierbei über eine Ventilfeder 30 in Richtung einer Schließposition mit einer Federkraft beaufschlagt und mit einer Kraft entgegen der Federkraft in Richtung einer Öffnungsposition über einen elektromagnetischen Aktuator 32 beaufschlagbar. Die Schaltventile 20, 22 und 28 sind somit in unbestromten Zustand geschlossen. Das Schaltventil hat eine Durchströmungsrichtung und besitzt einen Öffnungsquerschnitt von beispielsweise 3.34 $mm^2$, bei einem Ventilhub von beispielsweise 0,2 mm. Bei einer am Schaltventil anliegende Druckdifferenz von 90 bar, ergibt sich beispielsweise ein Durchfluss von 20 l/min. Die Anzugs- und Abfallzeiten belaufen sich auf beispielsweise ca. 0,3 ms. Die relative Einschaltdauer (Verhältnis von bestromten Zustand zu stromloser Phase) ist auf maximal 20% festgelegt, da sonst die Überhitzung einer Magnetspule des Aktuators droht. Das Schaltventil kann beispielsweise auf etwa $10^9$ Schaltzyklen ausgelegt sein.

**[0031]** Zum Messen eines Verschiebewegs des Kolbens 4 bzw. der Kolbenstange 8 des Stellzylinders 2 ist ein Wegaufnehmer 34 vorgesehen. Dieser misst den Verschiebeweg mit einer bestimmten Abtastfrequenz und meldet diesen an eine nicht dargestellte elektronische Steuereinheit. Des Weiteren ist ein Drucksensor 36 vorgesehen, mit dem der Druck in der Druckleitung 14 gemessen wird und ebenfalls an die elektronische Steuereinheit gemeldet wird. Die Messung des Drucks erfolgt hierbei ebenfalls mit einer bestimmten Abtastfrequenz.

**[0032]** Damit die Schaltventile 20, 22, 28 schnell geschaltet werden können, ist die elektronische Steuereinheit vorzugsweise speziell ausgelegt. Hierbei handelt es sich beispielsweise um eine Endstufenelektronik, bei der auf jeder

Elektronik-Karte im Europaformat sich zwei programmierbare Elektronikbausteine befinden, die einen speziellen Stromverlauf generieren können. Über einen jeweiligen Elektronikbaustein, bei dem es sich beispielsweise um den Typ CJ840 handelt, können insbesondere vier Schaltventile angesteuert werden. Die CJ840-Bausteine sind beispielsweise über einen SPI-Bus anwendungsorientiert programmierbar. Als Ausgangsgrößen sind insbesondere eine maximale Spannung von 65 Volt und Stromspitzen von bis zu 12 Ampere möglich. Die Ansteuerung wird in der Regel über einen Mikrocontroller vorgenommen, weshalb mit Spannungspegel auf TTL-Basis gearbeitet wird.

**[0033]** Das grundsätzliche Regelungskonzept für eine digitale Druckregelung der Verdrängermaschine 1 lässt sich als eine Regelung mit Dreipunktverhalten beschreiben, siehe Figur 2. Der obere (Einschalt-) Punkt (P2) in Figur 2 markiert die Grenze zur Aktivierung des großen Schaltventils 20. Der untere Punkt (P1) veranlasst die Aktivierung des ausgangsseitigen Schaltventils 28. Zwischen den Schaltpunkten befindet sich die sogenannte Totzone der Regelung. Die Totzone kann auch als Toleranzbereich für die Regelabweichung gesehen werden, da die Regelung

**[0034]** Abweichungen innerhalb dieses Bereichs toleriert. In dieser Totzone hält die Regelung so lange inne, bis die Regelgröße durch Störeinflüsse usw. wieder einen Schaltpunkt überschreitet. Mit einem zusätzlichen kleinen Schaltventil 22 für die Feindosierung erhält diese Dreipunktregelung eine Erweiterung. Die anfängliche Idee besagt, dass das kleine Schaltventil 22 zur Feindosierung durch das große Schaltventil 20 verursachte Überdosierungen mit kombiniertem Schalten abschwächen soll. Das Schaltventil 20, zuständig für die grobe Dosierung (und damit für die schnelle Befüllung des Zylinderraums 6), soll früher deaktiviert werden und den Ausgleich der restlichen Regelabweichung übernimmt das kleine Schaltventil 22. Dieses bleibt also bis zur eigentlichen Einschaltgrenze (P2) aktiviert, während der Schaltpunkt für das große Schaltventil 22 (P3) höher angesetzt ist. Im Ganzen besitzt die über die Schaltventile 20, 22 und 28 gesteuerte Verstellung jedoch ein Dreipunktverhalten. Die Dreipunktregelung agiert also nicht mit einem einzelnen Aktor, welcher Ein-, Aus- und Haltephase ausführt. Vielmehr weist das Verstellsystem im Gesamten, bestehend aus drei Aktoren und dem Verstellmechanismus der Verdrängermaschine 1, dieses Verhalten auf.

**[0035]** Zum Regeln der Verstelleinheit mit dem Stellzylinder 2 und den Schaltventilen 20, 22 und 28 sind unterschiedlichste Regelungsverfahren vorgesehen, die im Folgenden erläutert sind.

**[0036]** Bei einem ersten Regelungsverfahren wird gemäß Figur 3 und 4 die Verdrängermaschine 1 aus Figur 1 in Abhängigkeit von dem Verschiebeweg des Kolbens 4 gesteuert, wobei der Verschiebeweg vom Wegaufnehmer 34 erfasst ist.

**[0037]** Gemäß Figur 3 steuert der Dreipunktregler Stellglieder in Form der Schaltventile 20, 22 und 28, siehe Figur 1, mit einer Steuergröße u. Dies wiederum führt zu einer Stellgröße y für den Stellkolben bzw. Kolben 4 des Stellzylinders 2. Daraus ergibt sich dann der Verschiebeweg des Kolbens 4 als "Regelgröße Weg s", aus der zusammen mit einer "Führungsgröße Weg $s_{soll}$" eine Regelabweichung e für den Dreipunktregler ermittelt wird. In Abhängigkeit von der Regelgröße Weg s wird die nicht dargestellte Schwenkwiege bzw. Schrägscheibe der Verdrängermaschine 1 aus Figur 1 angesteuert, was zu einem Schwenkwinkel $\alpha$ für das Triebwerk der Verdrängermaschine 1 führt. Dies wiederum hat einen bestimmten Volumenstrom Q zur Folge, der zum Verbraucher geführt wird, wodurch auf einen Druck p des Verbrauchers reagiert werden kann.

**[0038]** Somit ändert sich proportional zur Positionsänderung des Kolbens 4 der Schwenkwinkel, woraus ein veränderter Förderstrom resultiert. Abhängig vom Verbraucher ergibt sich dann der Druck. Der Kolben 4 soll innerhalb seines Verstellbereichs (beispielsweise max. 20 mm Verfahrweg) über die Befüllung des Zylinderraums 6 mittels der Schaltventile 20, 22, 28 in eine vorgegeben Position gebracht werden.

**[0039]** Die Figur 4 zeigt, wie die Kolbenposition als Regelgröße dem Sollwert nachfolgt. Dabei ist ein Sägezahnverlauf der Regelgröße zu erkennen. Dieser Verlauf ergibt sich aus der schlagartigen Befüllung über die Schaltventile 20, 22 (steigende Flanken) und der Entleerung durch das Schaltventil 28 (abfallende Flanken) bzw. der Leckage über den Kolben 4 (leicht abfallender Verlauf). Da die Schaltventile 20, 22, 28 mit fest eingestellter relativer Einschaltdauer von 20 % (maximal mögliche Einschaltdauer) geschalten werden, ergeben sich aus Überdosierungen herrührende Überschwinger im Verlauf. Um diese Überschwinger zu reduzieren und um die Leckage über den Kolben 4 auszugleichen, soll das kleine Schaltventil 22, als gedrosseltes Einlassventil für die Feindosierung, zum Einsatz kommen. Die Abtastung der Regelgröße wird nur zu Beginn des Schaltzyklus (beispielsweise mit Schaltfrequenz 10 Hz) vorgenommen. Daher sind in Figur 4 entsprechend verspätete Reaktionen der Regelgröße auf Änderungen der Führungsgröße zu erkennen. Alle Schaltventile 20, 22, 28 werden mit derselben Taktung und Einschaltdauer angesteuert. Das heißt, dass egal welches Schaltventil 20, 22, 28 geschalten hat, alle im Anschluss die Pausenphase von 80% relativ zur Schaltperiodendauer einhalten, selbst wenn inzwischen ein Schaltventil 20, 22, 28 ausregelnd reagieren müsste, das zuvor gar nicht geschalten hat. Dies muss kein wesentlicher Nachteil sein, da ein gemeinsames Schalten von Schaltventilen 20 bzw. 22 und 28 in der Regel nicht notwendig ist. Wie vorstehend bereits angeführt beträgt die Schaltfrequenz der Schaltventile 20, 22 und 28 10 Hertz. Eine Abtastfrequenz des Wegaufnehmers 34 auf Figur 1 beträgt ebenfalls 10 Hertz.

**[0040]** Bei Sollwertsprüngen ergeben sich teilweise Überschwinger, die von Überdosierungen herrühren, siehe Bezugszeichen 1 in Figur 4, verursacht durch die starr festgelegten Einschaltdauern. Durch die vergleichsweise geringe Abtast- und Schaltfrequenz stellen sich verzögerte Reaktionen der Regelgröße ein, siehe Bezugszeichen 2 in Figur 4. Der Vorteil dieser geringen Schaltfrequenz ist die daraus resultierende geringe Schalthäufigkeit. Durch die diskreten

Dosierschritte wird nur so viel Volumen in die Stellkammer eingelassen, wie notwendig. Daraus ergibt sich der große Vorteil, die Verluste beim Steueröl zum großen Teil einsparen zu können.

**[0041]** Mit Hilfe der Positionsregelung des Kolbens 4 oder der davon ableitbaren Schwenkwiegenregelung kann in erster Linie die Fördermenge der Verdrängereinheit 1 geregelt werden, da jeder Kolbenposition bzw. jedem Schwenkwinkel ein entsprechender Förderstrom zugeordnet werden kann. Der Druck baut sich jedoch abhängig von der Last unterschiedlich auf.

**[0042]** Gemäß Figur 5 wird bei einem weiteren Regelverfahren anstelle des Verschiebewegs des Kolbens 4 der Druck in der Druckleitung 14 aus Figur 1 als Regelgröße vom Drucksensor 36 erfasst.

**[0043]** Bei Verdrängermaschinen mit einem hydraulischen Druckregler hat dieser hauptsächliche die Aufgabe, den Druck an einen festgelegten Sollwert anzupassen. Es ist also keine auf Führungsverhalten orientierte Regelung, sondern eine auf ein Störverhalten ausgerichtete Regelung. Mit einem digitalen Druckregler ist auch eine auf Führungsverhalten orientierte Regelung möglich.

**[0044]** In Figur 6 wird das Regelverfahren mit Regelgrößen ohne zusätzliche Störgrößeneinflüsse (z.B. durch Pulsation usw.) betrachtet. Der Sollwert wird beispielhaft auf 100 bar festgelegt. Die Schaltfrequenz der Schaltventile 20, 22, 28 weist beispielsweise 10Hz auf. Je nach Zustand der Regelgröße wird zu Anfang des Schaltzyklus jenes Schaltventil 20, 22, 28 geschalten, das erforderlich ist, um die Regelgröße wieder der Führungsgröße anzugleichen. Außerdem erfolgt für alle Schaltventile 20, 22, 28 dieselbe Taktung und Schaltzykluserzeugung. Falls ein Druckanstieg schneller erfolgt, als die Regelung darauf reagieren kann, bietet das Überströmventil 36 aus Figur 1 eine Absicherung gegen zu hohe Druckspitzen. Das Überströmventil 36 arbeitet wie ein Sicherheitsventil. Es bewirkt eine zusätzlich zum Schaltventil 20, 22 stattfindende Befüllung der Stellkammer, wenn der Druck einen bestimmten Grenzwert überschritten hat. Um Überdosierungen zu vermeiden sind die Einschaltdauern der Schaltventile 20, 22 und 28 variabel einstellbar. Das heißt, die Schaltventile 20, 22, 28 können nach Bedarf auch früher abschalten, bevor die maximal mögliche Einschaltdauer erreicht ist. Dies erfolgt dadurch, dass nach dem notwendigen Schalten eines Schaltventils 20, 22, 28 im Abtasttakt die Regelgröße abgefragt wird und falls erforderlich (je nach Ergebnis der Abfrage) das Schaltventil wieder abgeschaltet wird. Die Abtastfrequenz beträgt vorzugsweise 1 kHz. Es wird weiterhin das kleine Schaltventil 22 zur Feindosierung verwendet. Dies ist jedoch dank der variabel einstellbaren Einschaltdauer des großen Schaltventils 20 nur noch für die intervallweise Nachdosierung der Leckage notwendig. Die Grenzen der Regler-Totzone (Schaltpunkte), siehe Figur 2, sind beispielsweise auf 5 bar über und 10 bar unter dem Sollwert festgelegt.

**[0045]** Figur 6 zeigt, wie nach einem anfänglichen Druckanstieg, siehe Bezugszeichen 1, durch Lasterhöhung das Überströmventil 26 das System gegen einen Druckanstieg von mehr als 25% über dem Sollwert (100 bar) absichert, Siehe Bezugszeichen 2. Zusätzlich zu Ist- und Sollwert ist in Figur 6 noch der Druckverlauf eingezeichnet, welcher sich ohne Regelung ergeben würde. Erst zum zweiten Schaltzyklusbeginn nach 100 ms kann die Regelung das erste Mal reagieren. Der darauffolgende Druckanstieg, siehe Bezugszeichen 3 ist das Resultat der Leckage über den Kolben 4, welche die langsame Entleerung des Zylinderraums 4 zur Folge hat. Zum nächsten Anfang des Schaltzyklus ist durch die Leckage die Regelgröße über den oberen Schaltpunkt des großen Schaltventils 20, siehe Bezugszeichen 4, angestiegen. Das Schalten des Schaltventils 20 bewirkt ein Abfallen des Drucks. Zum Zeitpunkt 300 ms befindet sich die Regelgröße noch innerhalb der Totzone des Reglers. Lediglich die zu jedem Beginn der Schaltzyklen aktive Nachdosierung der Leckage über das kleine Schaltventil 22 bewirkt eine Anpassung des Druckverlaufs an die Führungsgröße, siehe Bezugszeichen 5. Bei Reduzierung der Last und damit abfallendem Druck, siehe Bezugszeichen 6, kann die Regelung erst mit der Verspätung eines Schaltzyklus reagieren, siehe Bezugszeichen 7. Der zweite Lastanstieg (bemerkbar durch den ansteigenden ungeregelten Druck) bewirkt weitere Abweichungen der Regelgröße, bis hinein in die Druckbegrenzung des Überströmventils 26, siehe Bezugszeichen 8.

**[0046]** Die variable Einschaltdauer trägt wesentlich dazu bei, die Reaktionsfähigkeit und die Genauigkeit des Druckverlaufs zu erhöhen. Dabei kann hinsichtlich der Funktion zur Reduzierung von Überdosierungen sogar auf das kleine Schaltventil 22 verzichtet werden. Für die Feindosierung kommt es dagegen noch zum Einsatz. Weiterhin positiv bleibt der Aspekt der Verlustreduzierung beim Steueröl.

**[0047]** Im Folgenden wir anhand der Figur 7 ein Regelverfahren einer Druckregelung der Verdrängereinheit 1 mit einem "verschachteltem Schaltzyklus" beschrieben. Um noch schnellere Reaktionen der Regelgröße zu ermöglichen, wird im Folgenden nicht mit einem starren Schaltzyklus gefahren. Wenn ein neuer Schaltzyklus beginnt und an dessen Anfang kein Schalten erforderlich ist, wird nicht ein weiterer Schaltzyklus gänzlich pausiert, sondern ab diesem Zeitpunkt im Abtasttakt von beispielsweise 1 kHz nach einer notwendigen Schaltanforderung gefragt. Wenn dann nach einigen Abfragezeitpunkten ein Schalten der Schaltventile 20, 22, 28 notwendig ist, wird anschließend der normale Schaltzyklus abgefahren, mit dem entsprechend erforderlichen Einschaltverhältnis und dem notwendigen Pausenverhältnis.

**[0048]** In Figur 7 ist zu erkennen, dass beispielsweise schon einige Millisekunden vor dem Zeitpunkt 500 ms eine Reaktion des Schaltventils 20 erfolgt, siehe Bezugszeichen 1 in Figur 7, da nach dem Ablauf der letzten Pausendauer kein Schalten notwendig war. Diese Reaktion wäre mit dem vorherigen Regelungskonzept erst zum Zeitpunkt 500 ms erfolgt. Somit ergibt sich eine weitere Maßnahme zur Eindämmung des durch die Leckage verursachten Drifts im Druckverlauf.

**[0049]** Durch die Abschaffung des starren Schaltzyklus wird die Reaktion der Regelgröße weiter erhöht. Wenn hierbei das kleine Schaltventil 22 zusätzlich noch eingesetzt wird, kann der Regelverlauf noch geringfügig weiter verbessert werden.

**[0050]** Anhand Figur 8 wird ein Regelverfahren einer Druckregelung mit einer getrennten Ventilansteuerung der Schaltventile 20, 22 und 28 erläutert.

**[0051]** Bei Betrachtung der reinen Befüllung und Entleerung des Zylinderraums 6, ist ein gemeinsames Schalten von Schaltventilen 20 bzw. 22 und 28 in der Regel nicht notwendig und somit eine gemeinsame Ansteuerung nicht nachteilig. Jedoch bringt ein kombiniertes Schalten der Schaltventile 20, 22, 28 hinsichtlich der gezielten Dosierung und hinsichtlich der besseren Reaktion bei schnellen mehrfachen Lastwechseln einen Vorteil.

**[0052]** Durch die Trennung der Ansteuerung bezüglich Abtastrate und Schaltzykluserzeugung können die Schaltventile 20, 22, 28 nun unabhängig voneinander und sogar gleichzeitig schalten. Das Öffnen des Schaltventils 28 hat nicht einen gleich großen Volumenstrom aus dem Zylinderraum 6 zur Folge wie der Volumenstrom in Zylinderraum 6, der sich bei gleich langem Öffnen des Schaltventils 20 ergibt. Am Schaltventil 28 liegt eine geringere Druckdifferenz an (Zylinderraumdruck zu Tankdruck) als am Schaltventil 20 (Hochdruck zu Zylinderraumdruck). Durch die geringere Druckdifferenz ergibt sich der kleinere Volumenstrom. Durch kombiniertes Schalten ist nun auch eine fein dosierende Befüllung möglich. Der Druckverlauf in Figur 8 zeigt, wie zu große Druckabfälle (durch Überdosierungen des Schaltventils 20) mit gleich im Anschluss erfolgenden Reaktionen des Schaltventils 28 teilweise ausgeglichen werden, siehe Bezugszeichen 1 in Figur 8. Schnelle Druckanstiege durch Lasterhöhung müssen nach wie vor vom Überströmventil 26 abgefangen werden, siehe Bezugszeichen 2 in Figur 8.

**[0053]** Das kombinierte Schalten erhöht die Genauigkeit des Regelverlaufs und macht dadurch auch die Notwendigkeit eines zur Feindosierung verwendeten Schaltventils 22 überflüssig.

**[0054]** Durch Erhöhung der Schaltfrequenz kann eine noch bessere Reaktionsfähigkeit ermöglicht sein.

**[0055]** In Figur 9 wird ein Regelverfahren einer Druckregelung mit einer hohen Schaltfrequenz erläutert. Die Optimierung der Reaktionsfähigkeit im Schaltverhalten kann schnelle Druckanstiege nach wie vor nicht verhindern, da große Schaltzyklen eine schnelle Reaktion der Regelung verschlechtern. Mit Erhöhung der Schaltfrequenz ergeben sich innerhalb eines bestimmten Zeitraums mehr Gelegenheiten zum Schalten der Schaltventile 20, 22, 28 und dadurch eine größere Reaktionsfähigkeit der Regelung auf Störeinflüsse.

**[0056]** Figur 9 zeigt, dass die Lasterhöhungen, welche zuvor von dem Überströmventil 26 abgefangen werden, nun größtenteils ausgeregelt werden können bevor die Absicherungsgrenze erreicht wird, siehe Bezugszeichen 1 in Figur 9. Wo sich zuvor noch größere Druckschwankungen im Regelverlauf zeigten, sind kaum noch größere Abweichungen zu erkennen, siehe Bezugszeichen 2 in Figur 9.

**[0057]** Durch die Erhöhung der Schaltfrequenz, beispielsweise auf 100 Hz, können schnelle Druckanstiege rechtzeitig ausgeregelt werden, so dass die Absicherung durch das Überströmventil 36 weniger oder gar nicht in Anspruch genommen werden muss. Durch die deutlich erhöhte Reaktionsfähigkeit wird auch der Regelverlauf merklich genauer. Störeinflüsse werden schneller ausgeregelt und der Druckverlauf passt sich deutlich besser der Führungsgröße an. Einziger Nachteil hierbei ist die Erhöhung der maximalen Schalthäufigkeit. Die Gesamtzahl der Schaltzyklen ist begrenzt und durch das vermehrte Schalten kann sich eine kürzere Lebensdauer der Schaltventile 20, 22, 28 ergeben. Die Schalthäufigkeit ist jedoch auch abhängig von der Dynamik der Regelgröße d.h. abhängig von den Lastzyklen, welche die Regelung bewältigen muss. Laständerungen haben Störeinflüsse in der Regelgröße zur Folge. Ein weiterer Einfluss auf das Schaltverhalten hat auch die Leckage über den Stellkolben. Je größer die Leckage konstruktiv bedingt ausfällt, desto mehr muss entsprechend nachgeregelt werden. Mit diesem Regelungskonzept kann nun ein relativ guter Verlauf der Regelgröße erzeugt werden.

**[0058]** Die hauptsächliche Aufgabe der Regelung besteht darin, die Regelabweichung mit den festgelegten Schaltpunkten der Schaltventile 20, 22, 28 zu vergleichen. Überschreitet die Regelabweichung den Wert eines Schaltpunkts, so wird nachfolgend die Aufforderung zur Öffnung des Schaltventils 20, 22, 28, dessen Schaltpunkt überschritten wurde, weitergeleitet. Im Subsystem "Pegelsteuerung" erfolgt die in der Abtastfrequenz vorgenommene Abfrage des Vergleichergebnisses. Wenn zu einem Abfragezeitpunkt die Regelung eine Reaktion des Schaltventils 20, 22, 28 erfordert, dann wird ein Schaltimpuls gestartet. Der Schaltimpuls ist logisch gekoppelt an ein Einschaltdauersignal. Dies wird zu Beginn eines jeden Schaltzyklus gestartet und dauert maximal 20 % der Schaltperiode. Somit ist gewährleistet, dass keine Einschaltdauer die vorgeschriebene relative Einschaltdauer überschreitet, selbst wenn danach das Schaltventil 20, 22, 28 laut Regelabweichung weiterhin geöffnet bleiben sollte. Der Schaltimpuls wird wiederum rückgekoppelt mit den Abtastimpulsen verknüpft, so dass während des Einschaltzustands eine Abfrage des Vergleichsergebnisses im Abtasttakt möglich ist. Dadurch ist dann eine frühere Abschaltung möglich, falls die Regelabweichung vor Ende der 20 % Einschaltdauer wieder ausgeglichen wurde.

**[0059]** Die Ansteuerung des Schaltventils 28 ermöglicht nach der Pegelsteuerung die Option einer Schaltsicherung. In bestimmten Fällen muss die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass die Regelgröße über eine längere Zeitspanne an die Führungsgröße nicht heranreichen kann. Das ist beispielsweise der Fall, wenn trotz ausgeschwenktem Zustand der Verdrängermaschine 1 (maximaler Schwenkwinkel) die Förderleistung nicht ausreicht, um den Druck-

Sollwert aufbauen zu können. Damit nun das Schaltventil 28 nicht ständig zum Schalten aufgefordert wird, obwohl der Zylinderraum 6 schon entleert ist, hilft die Schaltsicherung dabei unnötiges Schalten des Schaltventils 28 zu vermeiden. Einfach ausgedrückt, zählt die Sicherung bei positivem Vergleichsergebnis (Schaltventil 20 muss schalten) die Schaltzyklen. Ändert sich die Regelweichung trotz einer ausreichend großen Anzahl von Schaltvorgängen nicht, geht die Sicherung davon aus, dass der Zylinderraum 6 schon entleert ist und weitere Schaltvorgänge vorerst keine Änderungen mehr erzeugen würden. Ein weiteres Schalten des Schaltventils 28 wird solange unterdrückt, bis sich die Regelabweichung wieder innerhalb der Totzone des Reglers befindet.

**[0060]** In Figur 10 wird nochmals das grundsätzliche Funktionsprinzip grafisch verdeutlicht. Wenn sich die Regelgröße (Ist-Zustand) über die durch die Schaltpunkte markierten Grenzen der Totzone der Regelung begibt, werden entsprechend der vorgeschriebenen Schaltcharakteristika die Schaltventile 20, 22, 28 aktiviert, um die Regelgröße wieder der Führungsgröße (Sollwert) anzugleichen.

**[0061]** Im Folgenden wird anhand Figur 11 eine Konfiguration der Ventilansteuerung erläutert. Figur 11 zeigt die Charakteristik des Stromverlaufs, welche die Endstufe generiert, um den Ventilen schnelles Schalten zu ermöglichen. Die Programmierung (setzten von Bits in Registern des CJ840-Elektronikbausteins) wird beispielsweise über einen Computer manuell durchgeführt. Verschiedene Bit-Kombinationen in fünf Registern stehen für unterschiedliche Eigenschaften, die veränderbar sind. Nach Einschalten der Spannungsversorgung werden die Register auf eine Default-Einstellung gesetzt. Der Stromverlauf in Figur 11 zeigt die Stromwerte, welche sich durch die Ausgangseinstellung ergeben.

**[0062]** Das Einschaltverhalten der Schaltventile 20, 22, 28 ist im Wesentlichen in fünf Phasen aufgeteilt. Das Ansteuersignal der Regelung gibt den Befehl zum Öffnen des Schaltventils 20, 22, 28 an die Endstufe weiter. Um das Schaltventil 20, 22, 28 zu öffnen, wird zunächst ein großer Strom benötigt, der über eine Spannung von maximal 65 Volt erreicht wird. Der Strom dieser sogenannten Boostphase ist genauso wie der Zeitrahmen, der dem Boost zur Verfügung steht, einstellbar. Je größer dieser Stromboost ist, desto schneller kann sich das Magnetfeld in einer Magnetspule des Aktuators 32 aus Figur 1 aufbauen und den Ventilanker in Bewegung versetzten. Ebenfalls programmierbar ist die darauf folgende "Pick-Up"-Phase, welche über pulsweitenmodulierte Spannung einen bestimmten Stromwert einnimmt, bis das Schaltventil 20, 22, 28 garantiert geöffnet hat. Danach erfolgt eine Schnelllöschung des Stroms über eine hohe negative Spannung und verharrt bei einem ebenfalls über PWM geregelten Haltestrom. Die Phase der Haltestromregelung dient zum Einhalten des geöffneten Zustands und wird bei Anforderung zum Schließen ebenfalls durch Schnelllöschung beendet. Auch hier sind Zeitrahmen und Stromwerte einstellbar.

**[0063]** Im Einsatz der Verdrängermaschine 1 können Volumenstrompulsationen auftreten, aus denen wiederum eine Pulsation des Drucks erfolgen kann. Die Regelgröße weist durch die

**[0064]** Pulsation einen signalverrauschten Verlauf auf. Für eine möglichst genaue und effiziente Regelung ist aber die Abtastung einer möglichst genauen Regelgröße notwendig. Zur Glättung der Abtastgröße gibt es verschiedene Möglichkeiten, die nachfolgend erläutert werden.

**[0065]** Es ist denkbar, die Abtastgröße mit einem Hardwarefilter zu glätten, wie beispielsweise das Bessel-Tiefpassfilter.

**[0066]** Möglich ist auch, die Abtastgröße mittels eines Softwarefilters zu glätten. Die Anwendung digital programmierter Filtermethoden bietet verschiedene Möglichkeiten. Softwarefilter, welche durch den gleitenden Mittelwert ein geglättetes Signal errechnen, erreichen geringere Laufzeiten als Hardware-basierte Filter. Doch erhält man nur dann eine ausreichende Signalglättung, je mehr Messwerte in der Mittelwertbildung verarbeitet werden. Da bei der digitalen Druckregelung mit einer Abtastfrequenz von 1 kHz gearbeitet wird, hätte dies eine Verzögerung von mehreren Millisekunden zur Folge. So eine Zeitverzögerung würde die Regelung instabil machen. Die Instabilität ergäbe sich aus Überdosierungen der Schaltventile 20, 22, 28. Diese würden aufgrund der durch die Filterung verursachten Zeitverzögerungen nicht rechtzeitig schalten.

**[0067]** Das beste Glättungsergebnis wird erreicht, wenn die Abtastung der zu mittelnden Werte gerade noch dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem (Formel 1) entspricht, woraus wiederum eine zu große Zeitverzögerung des Signals resultiert.

$$f_{abtast} > 2 \cdot f_{\max} \qquad \textbf{Formel 1}$$

**[0068]** Eine höhere Abtastfrequenz ermöglicht zwar die erwünschte geringere Zeitverzögerung, jedoch wird dadurch die Glättung immer weniger effizient, da sich dann auch wieder die hochfrequenten Schwingungen aus dem Mittelwert der größeren Anzahl von Abtastpunkten ergeben.

**[0069]** Bei einer Glättung mit einem Tiefpassfilter kann die Filterung des Signals mittels eines einfachen PT1-Gliedes umgesetzt werden. Die Eckfrequenz der Übertragung $f_E$ wird über die Zeitkonstante $T_z$ verändert.

$$T_z = \frac{1}{\omega_E} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_E}$$ **Formel 2**

**[0070]** Die im Übertragungsverhalten des PT1-Glieds bemerkbare Phasenverschiebung (=Signallaufzeit) wird mit größer werdender Eckfrequenz für relativ kleine Frequenzen auf den Mikrosekundenbereich reduziert. Jedoch muss beachtet werden, dass die Eckfrequenz nicht viel größer als die Pulsationsfrequenz sein darf, da der Filter sonst wirkungslos wäre.

**[0071]** Eine weitere Möglichkeit einer Tiefpassfilterung bietet die Kompressibilität und Trägheit des Hydraulikmediums. Der Ansatz sieht also eine Glättung oder Dämpfung des Pulsationssignals vor, die schon vor dem Messglied im Übertragungsmedium stattfindet. Abhängig vom Volumen zwischen Druckaufnahme und Triebwerk (Erzeuger der Pulsation) und allgemein vom gesamten Systemvolumen kommt die Pulsation entsprechend gedämpft beim Sensor an.

**[0072]** Eine weitere Möglichkeit zur Glättung bietet ein numerischer Pulsationsfilter. Der maßgebliche Störfaktor in der Regelgröße stellt die Pulsation dar. Sie ist hauptsächlich abhängig von der Drehzahl und der Anzahl von Triebwerkskolben. Deshalb kann die Pulsation mathematisch annähernd durch einen Sinus beschrieben werden. Dadurch ergibt sich der Ansatz aus dem durch den Druckaufnehmer ermittelten Drucksignal die Pulsation gewissermaßen herauszurechnen. Die Pulsation stellt im Realfall jedoch keinen idealen Sinus dar, sondern eine Überlagerung mehrerer Sinus-Signale mit unterschiedlichen Frequenzen und Amplituden. Daher können bei der Filterung mithilfe eines vereinfachten Sinus lediglich die größten Störeinflüsse herausgefiltert werden. Für eine effektivere Glättung müssten alle weiteren Sinus-Signale in die Filterung mit ein berechnet, sowie weitere Einflüsse berücksichtigt werden. Einflüsse auf die Charakteristik der Pulsation ergeben sich unter anderem auch aus dem Lastverhalten, das jedoch schwer vorzusagen ist.

**[0073]** Eine weitere Möglichkeit die Regelung zu optimieren liegt darin, die Schaltfrequenz zu ändern, siehe Figur 12. Ein größeres Reaktionsvermögen der Regelung sollte eine höhere Schaltfrequenz mit sich bringen können. Dabei kann die Schaltfrequenz jedoch nicht beliebig erhöht werden. Die Dynamik der Schaltventile gibt die Grenzen der maximal möglichen Schaltfrequenz vor. Das heißt, dass die maximal mögliche relative Einschaltdauer innerhalb der Schaltperiodendauer nicht kleiner sein darf, als das Schaltverhalten des Schaltventils 20, 22, 28 es zulässt. Wie in Figur 12 zu sehen, liegt die relative Einschaltdauer bei der Schaltfrequenz von 200 Hz bei einer Millisekunde. Da das Ventil bestenfalls allein 0,6 ms für Öffnungs- und Schließvorgang benötigt, ständen in dem Fall nur 0,7 ms für den geöffneten Zustand zur Verfügung und das für die maximale Einschaltdauer.

**[0074]** Im Endeffekt ist bei dieser Schaltfrequenz die Reaktion der Regelung nicht mehr von einer änderbaren Einschaltdauer abhängig, sondern von der Summe der Schaltvorgänge mit gleichbleibenden Einschaltdauern von einer Millisekunde. Die einzige Möglichkeit die Einschaltdauer zu beeinflussen bietet die Erhöhung der Abtastrate um das Zweifache. Dadurch sind Öffnungsdauern mit der Hälfte der maximalen Einschaltdauer möglich. Da die Öffnungs-und Schließdauern des Ventils fix bleiben, ergibt sich in diesem Fall eine Reduzierung des Dosierungsvorgangs um 0,2 ms. Daher kann die Schaltfrequenz von 200 Hz als Obergrenze betrachtet werden. Die Realisierung größerer Schaltfrequenzen wäre nicht lohnenswert, da die Schaltdynamik der Magnetventile die Schaltanforderungen nicht mehr ausführen könnte.

**[0075]** Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung des Reaktionsvermögens könnte die Erweiterung der Regelung durch eine innere Rückführung mit einstellbarem Zeitverhalten bieten. Wie der Regelkreis in Figur 13 zeigt, wird dies über eine interne Rückkopplung mit einem PT1-Glied realisiert.

**[0076]** Je nach Parametereinstellung der PT1-Übertragungsfunktion wird die Regelabweichung damit entsprechend modifiziert, so dass die Schaltpunkte des Dreipunktreglers früher erreicht werden. Die Regelabweichung erhält durch die rückführende Korrektur sozusagen einen vorauseilenden Charakter. Die Regelung veranlasst dadurch früher die Stellgrößenänderung und kann so schneller einer vom Sollwert abweichenden Regelgröße entgegenwirken. Die Größe des Korrekturschritts ergibt sich aus den Rückführgrößen, der Verstärkung $K_r$ und der Zeitkonstante $T_r$ und ist proportional zur Größe des Eingangssprungs. Der P-Anteil des Reglers ergibt sich aus der Stellgrößenänderung, welche aus dem Korrekturschritt resultiert. Die Verstellung zählt durch ihren integrativen Charakter im Regelkreis zum Bestandteil der Reglerfunktion (I-Anteil).

**[0077]** Näherungsweise ergibt sich für einen Dreipunktregler mit nachgeschaltetem integralem Stellsystem folgende Übertragungsfunktion:

$$G(s) = \frac{1}{Gr(s)} \cdot Gm(s) = \frac{Tr}{Kr \cdot Tm}\left(1 + \frac{1}{Tr \cdot s}\right)$$ **Formel 3**

**[0078]** Bei der Übertragungsfunktion wird deutlich, dass dieser Regler ein PI-Verhalten aufweist. Der Faktor vor der Klammer aus Formel 3 kann mit dem Verstärkungsfaktor K der Übertragungsfunktion des PI-Reglers gleichgesetzt werden, sowie die Zeitkonstanten $T_r$ und TN:

$$G(s) = K\left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s}\right) \qquad \textbf{Formel 4}$$

**[0079]** Je größer die Verstärkung der Rückkopplung Kr (oder je kleiner Tr), desto größer wird die Vorauseilung (Korrekturschritt) der Regelabweichung, welche sich durch die interne Rückführung ergibt. Die Gesamtverstärkung des Quasi-PI-Reglers wird dabei kleiner. Durch den vorauseilenden Charakter der durch die Rückführung modifizierten Regelabweichung werden die Schaltpunkte der Regelung früher erreicht.

**[0080]** Hinsichtlich des unterschiedlichen Volumenstroms über Ein- und Auslassventil 20, 28 (verursacht durch unterschiedlichen Druckabfall), ist eine zweifache, für jedes Ventil 20, 28 getrennte Rückführung besser geeignet. Eine gemeinsame Rückführung würde nicht der Tatsache gerecht werden, dass über das Auslassventil 28 durch den geringeren Druckabfall ein kleinerer Volumenstrom zu erwarten ist. Unterschiedlich große Volumenströme bedeuten unterschiedliche Einflüsse auf die Verstärkung der Verstellung.

**[0081]** Das Einlassventil besitzt durch den größeren Volumenstrom, den es zur Verfügung stellen kann, sozusagen auch eine größere verstärkende Wirkung als das Auslassventil 28. Deshalb sollte für das Auslassventil 28 eine geringere Vorauseilung ermöglicht werden, da hier die Gefahr der Überdosierungen durch die kleinere Volumenstrom-Verstärkung geringer ist als beim Einlassventil 20. Eine für jedes Ventil 20, 28 eigene Rückführung ermöglicht so individuelle Konfigurationen, welche den unterschiedlichen Volumenstrom-Verstärkungen gerecht werden kann.

**[0082]** Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Dosierauflösung kann eine höhere Abtastrate bieten. Genau wie bei der Schaltfrequenz ergeben sich jedoch auch hier Grenzen, welche durch die Dynamik der Magnetventile vorgegeben werden. Eine Abtastfrequenz von mehr als 2 kHz wäre nicht mehr lohnenswert, da die Ventile 20, 22, 28 mindestens 300 µs benötigen bis diese ganz geöffnet oder geschlossen haben. Ein Abtastzeitfenster von größer als die Öffnungs- bzw. Schließdauer garantiert, dass das Ventil 20, 22 28 beim Öffnungs- oder Schließvorgang nicht unterbrochen werden kann. So kann besser gewährleistet werden, dass das Ventil 20, 22, 28 nicht unnötig oft vergeblich bestromt wird.

**[0083]** Durch die Verzweifachung der Abtastfrequenz kann die Dosierauflösung ebenfalls verdoppelt werden. Das heißt es können feinere Dosierungen vorgenommen werden und dadurch Überdosierungen besser vermieden werden. Gleichzeitig würde eine größere Abtastung eventuell eine Erhöhung des Reaktionsvermögens mit sich bringen. Die Steuerung der relativen Einschaltdauer kann dadurch in einer größeren Auflösung vorgenommen werden, d.h. es kann gegebenenfalls früher mit dem Abschalten der Ventile 20 22, 28 begonnen werden, als mit den üblichen 1 kHz.

**[0084]** Gemäß Figur 14 ist ein hydraulischer Schaltplan dargestellt, der eine Verdrängermaschine 38 zeigt, die als Hydropumpe und- Motor einsetzbar ist. Neben dem Stellzylinder 2 ist ein weiterer Stellzylinder 40 dargestellt, der einen Kolben 42 aufweist. Vom Kolben 42 aus erstreckt sich eine Kolbenstange 44, die an einer nicht dargestellten Schrägscheibe der Verdrängermaschine 38 angreift. Der Kolben 42 begrenzt mit seiner von der Kolbenstange 44 wegweisenden Seite einen Zylinderraum 46, der mit der Druckleitung 14 der Verdrängermaschine 38 verbunden ist. In dem Zyliriderraum 46 ist eine Feder 48 angeordnet, die den Kolben 42 mit einer Federkraft in Richtung des sich vergrößernden Zylinderraums 46 beaufschlagt. Der Kolben 42 des Stellzylinders 40 wirkt gegen den Kolben 4 des Stellzylinders 2. Eine Verschiebung des Kolbens 42 in Richtung des sich vergrößernden Zylinderraums 46 führt somit zu einer Verschiebung des Kolbens 4 in Richtung eines sich verkleinernden Zylinderraums 6 und umgekehrt. Im Unterschied zum hydraulischen Schaltplan aus Figur 1 sind gemäß Figur 14 kein zweites Schaltventil zwischen dem Zylinderraum 6 und der Druckleitung 14 und auch kein Überströmventil vorgesehen.

**[0085]** Die Schaltventile 20, 22 und 28 aus Figur 1 bzw. die Schaltventile 20 und 28 aus Figur 14 sind im Pulse-Width-Modulated-Modus (PWM), im Meter-In/Meter-Out (MIO) oder im ballistischen Modus (BAM) ansteuerbar. Gemäß Figur 1, bei der zwei Schaltventile 20 und 22 am Druckmittelströmungspfad zwischen der Druckleitung 14 und dem Zylinderraum 6 vorgesehen sind, können die Schaltventile im Pulscode-Modulated-Modus (PCM) angesteuert werden. Die Ansteuerung von Schaltventilen im ballistischen Modus ist beispielsweise in dem Dokument DE 10 2009 052 285 A1 offenbart.

**[0086]** Offenbart ist insbesondere erfindungsgemäß eine Verstellstelleinheit für eine verstellbare hydraulische Verdrängermaschine mit einem Druck-Förderstromregler. Die Verstelleinheit hat zumindest einen Stellzylinder zum Verstellen eines Hubraums der Verdrängermaschine. Der Stellzylinder wird über Schaltventile angesteuert.

Bezugszeichenliste:

1 Verdrängermaschine

(fortgesetzt)

| | |
|---|---|
| 2 | Stellzylinder |
| 3 | Verstelleinheit |
| 4 | Kolben |
| 6 | Zylinderraum |
| 8 | Kolbenstange |
| 10 | Rückstellfeder |
| 12 | Ringraum |
| 14 | Druckleitung |
| 16 | Tankleitung |
| 18 | Tank |
| 20 | erstes Schaltventil |
| 22 | zweites Schaltventil |
| 24 | Drossel |
| 26 | Überströmventil |
| 28 | Schaltventil |
| 30 | Ventilfeder |
| 32 | Aktuator |
| 34 | Wegaufnehmer |
| 36 | Drucksensor |
| 37 | Steuereinheit |
| 38 | Verdrängermaschine |
| 40 | Stellzylinder |
| 42 | Kolben |
| 44 | Kolbenstange |
| 46 | Zylinderraum |
| 48 | Feder |

**Patentansprüche**

1. Druck-Förderstromregler zum Verstellen einer Verstelleinheit (3) einer verstellbaren hydraulischen Verdrängermaschine (1), wobei ein Schaltventil (20, 22, 28) zum Ansteuern der Verstelleinheit (3) vorgesehen ist.

2. Druck-Förderstromregler nach Anspruch 1, wobei das zumindest eine Schaltventil (20, 22, 28) im Pulse-Width-Modulated-Modus (PWM) oder im ballistischen Modus (BaM) eingesetzt ist.

3. Druck-Förderstromregler nach Anspruch 1 oder 2, wobei das zumindest eine Schaltventil (20, 22, 28) zum Steuern einer Verbindung zwischen der Verstelleinheit und einer Druckmittelquelle (14) und zumindest ein Schaltventil (20, 22, 28) zum Steuern einer Verbindung zwischen der Verstelleinheit und einer Druckmittelsenke (18) vorgesehen ist.

4. Druck-Förderstromregler nach Anspruch 3, wobei die Schaltventile (20, 22, 28) im Meter-In/Meter-Out (MIO) angesteuert sind.

5. Druck-Förderstromregler nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zumindest zwei Schaltventile (20, 22, 28) zum Steuern einer Verbindung zwischen der Verstelleinheit und der Druckmittelquelle (14) und/oder zwei Schaltventile (20, 22, 28) zum Steuern einer Verbindung zwischen der Verstelleinheit und einer Druckmittelsenke (18) vorgesehen sind.

6. Verstelleinheit für eine verstellbare hydraulische Verdrängermaschine (1) mit einem Druck-Förderstromregler gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche mit zumindest einem Stellzylinder (2) zum Verstellen eines Hubraums der Verdrängermaschine (1), wobei der Stellzylinder (2) einen von einem Kolben (4) begrenzten Zylinderraum (6), der zum Verschieben des Kolbens (4) in Richtung des sich vergrößernden Zylinderraum (6) über das Schaltventil (20, 22) des Druck-Förderstromreglers mit einem von einer Druckleitung (14) der Verdrängermaschine (1) abgegriffenen Druckmittel beschickbar ist und der zum Entlassen von Druckmittel aus dem Zylinderraum (6) über ein weiteres

Schaltventil (28) mit der Druckmittelsenke (18) verbindbar ist.

**7.** Verstelleinheit nach Anspruch 6, wobei eine elektronische Steuereinheit (37) vorgesehen ist, die die Schaltventile (20, 22, 28) in Abhängigkeit eines Drucks, insbesondere in der Druckleitung (14), und/oder eines Verschiebewegs des Kolbens (4) des Stellzylinders (2) steuert.

**8.** Verstelleinheit nach Anspruch 7, wobei die Steuereinheit (37) die Schaltventile (20, 22, 28) mit einer Dreipunktregelung ansteuert.

**9.** Verstelleinheit nach einem der Ansprüche 6 bis 8, wobei ein Schaltzyklus eines Schaltventils (20, 22, 28) ein vorbestimmtes Verhältnis von einer Einschalt- zu einer Ausschaltdauer aufweist.

**10.** Verstelleinheit nach einem der Ansprüche 7 bis 9, wobei eine Abtastung des Drucks und/oder des Verschiebewegs mit einer bestimmten Abtastfrequenz und einer Ansteuerung der Schaltventile (20, 22, 28) mit einer bestimmten Schaltfrequenz etwa synchron erfolgt.

**11.** Verstelleinheit nach Anspruch 9 oder 10, wobei die Schaltzyklen der Schaltventile (20, 22, 28) unabhängig voneinander sind.

**12.** Verfahren zum Regeln einer Verstelleinheit gemäß einem der Ansprüche 6 bis 11, mit den Schritten:

- Abtasten des Verschiebewegs des Kolbens (4) des Stellzylinders (2) und/oder eines Drucks
- Steuern der Schaltventile (20, 22, 28) in Abhängigkeit des Verschiebewegs und/oder des Drucks.

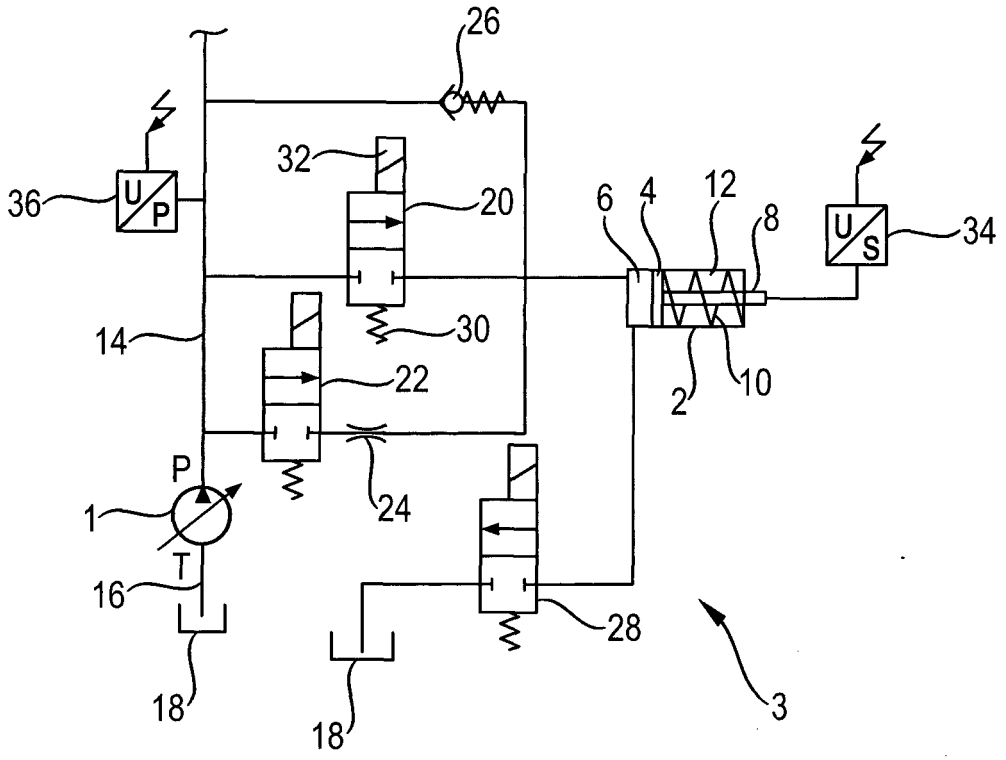

26
32
20
36
U/P
6
4
12
8
U/S
34
14
30
22
2
10
P
1
24
T
16
28
18
18
3

Fig. 1

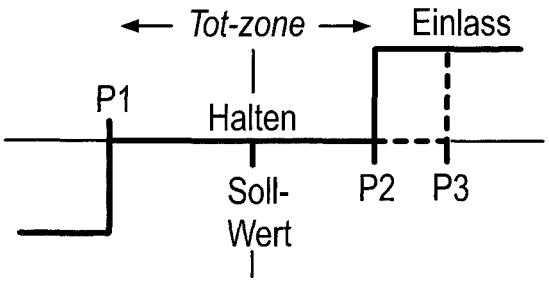

Tot-zone
Einlass
P1
Halten
Soll-
Wert
P2
P3

Fig. 2

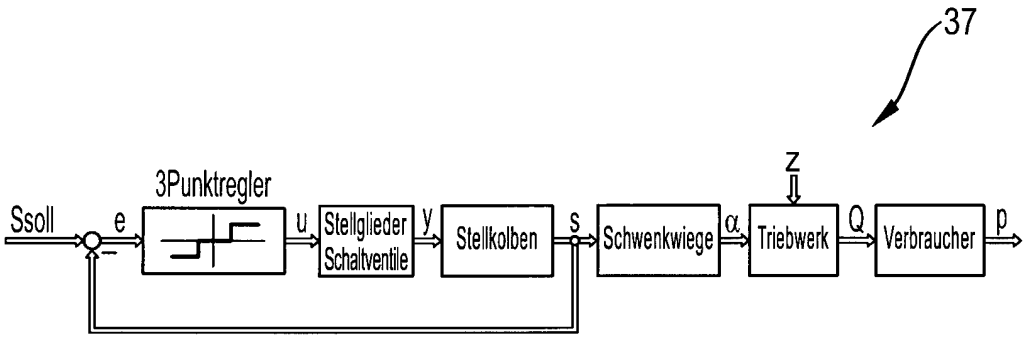

37
3Punktregler
Ssoll
e
u
Stellglieder
Schaltventile
y
Stellkolben
s
Schwenkwiege
α
z
Triebwerk
Q
Verbraucher
p

Fig. 3

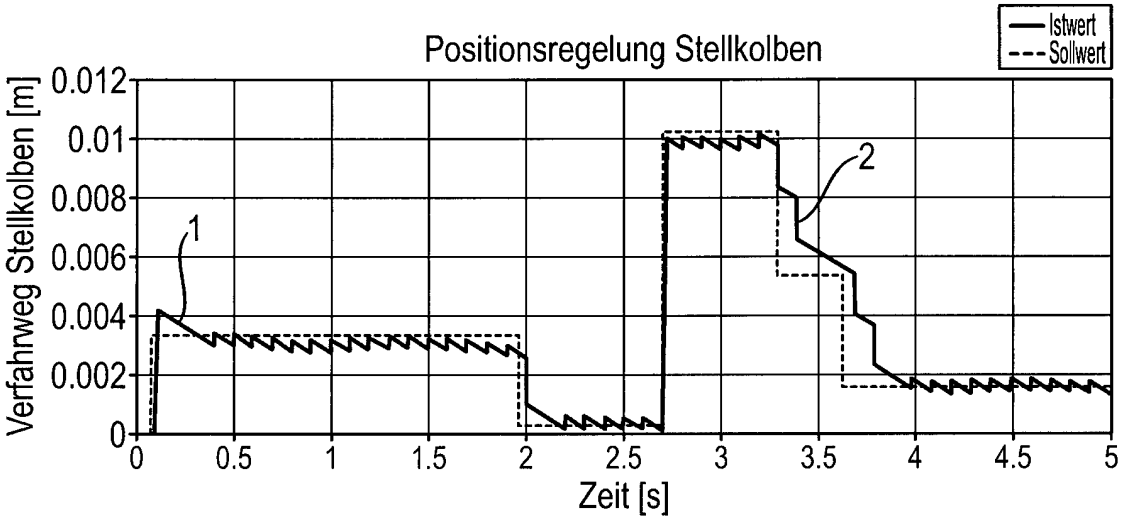

Positionsregelung Stellkolben
Istwert
Sollwert
Verfahrweg Stellkolben [m]
0.012
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5
Zeit [s]
1
2

Fig. 4

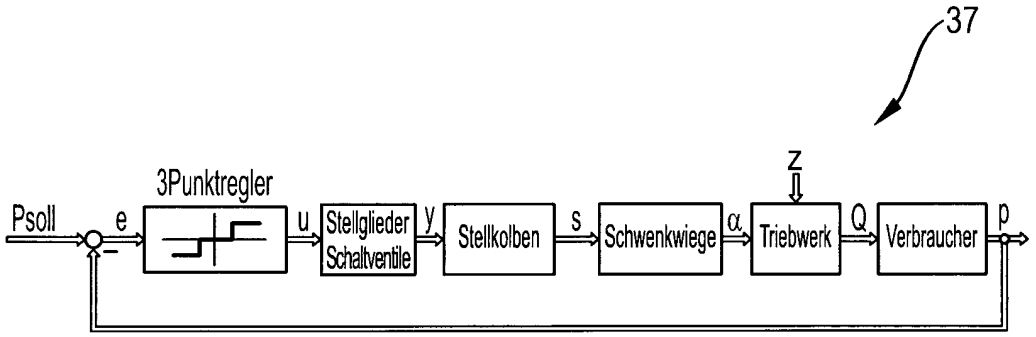

37
3Punktregler
Psoll
e
u
Stellglieder
Schaltventile
y
Stellkolben
s
Schwenkwiege
α
z
Triebwerk
Q
Verbraucher
p

Fig. 5

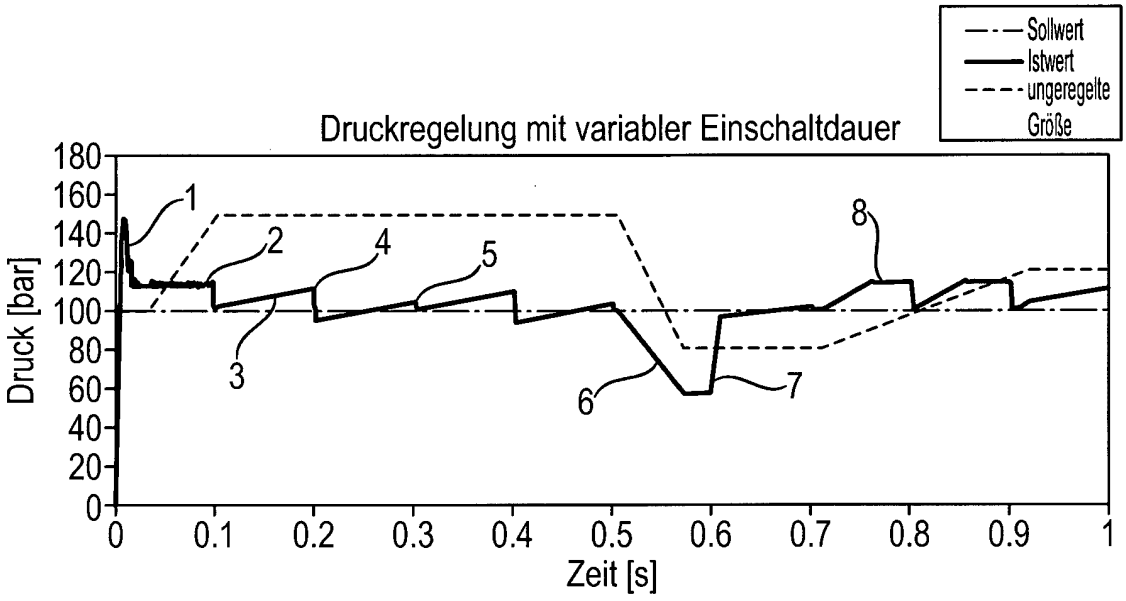

Sollwert
Istwert
ungeregelte Größe
Druckregelung mit variabler Einschaltdauer
Druck [bar]
Zeit [s]
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
1
2
3
4
5
6
7
8

Fig. 6

**Fig. 7**

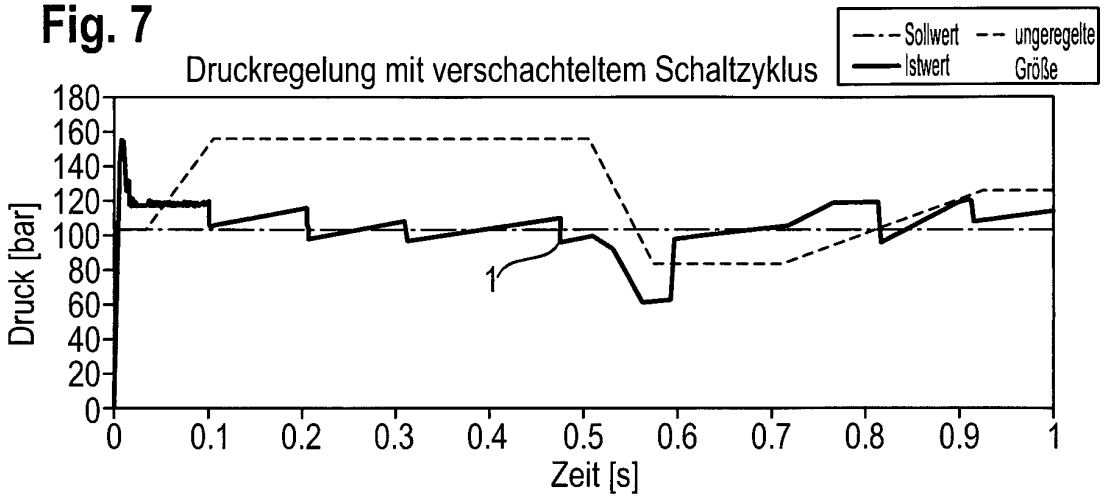



**Fig. 8**

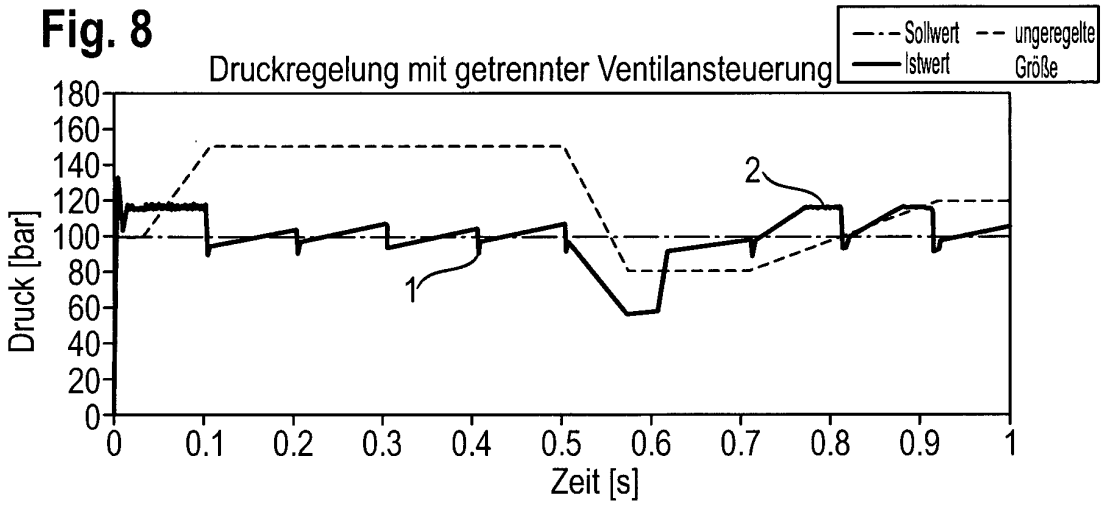



**Fig. 9**

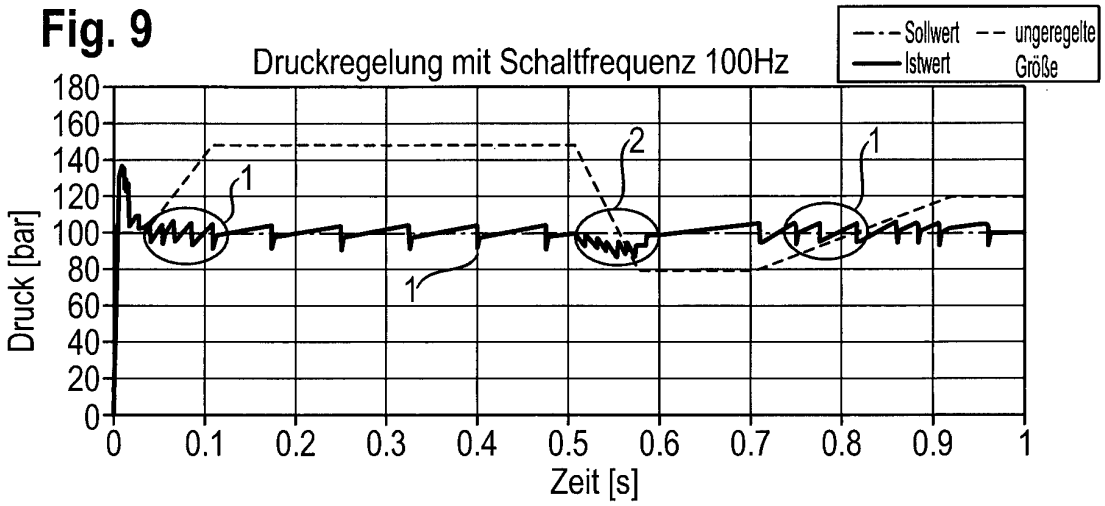
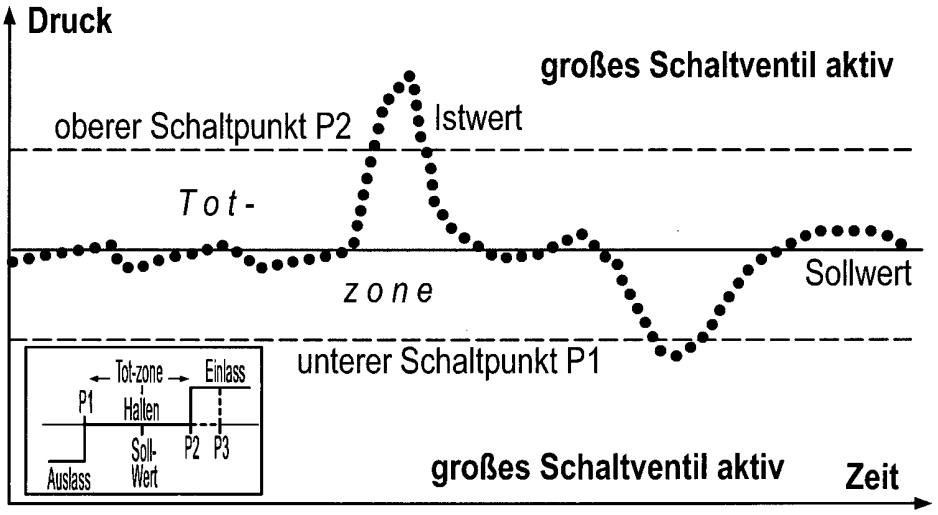


Fig. 10


Druck
großes Schaltventil aktiv
oberer Schaltpunkt P2
Istwert
Tot-
zone
Sollwert
unterer Schaltpunkt P1
Tot-zone
Einlass
P1
Halten
Soll-
Wert
P2
P3
Auslass
großes Schaltventil aktiv
Zeit

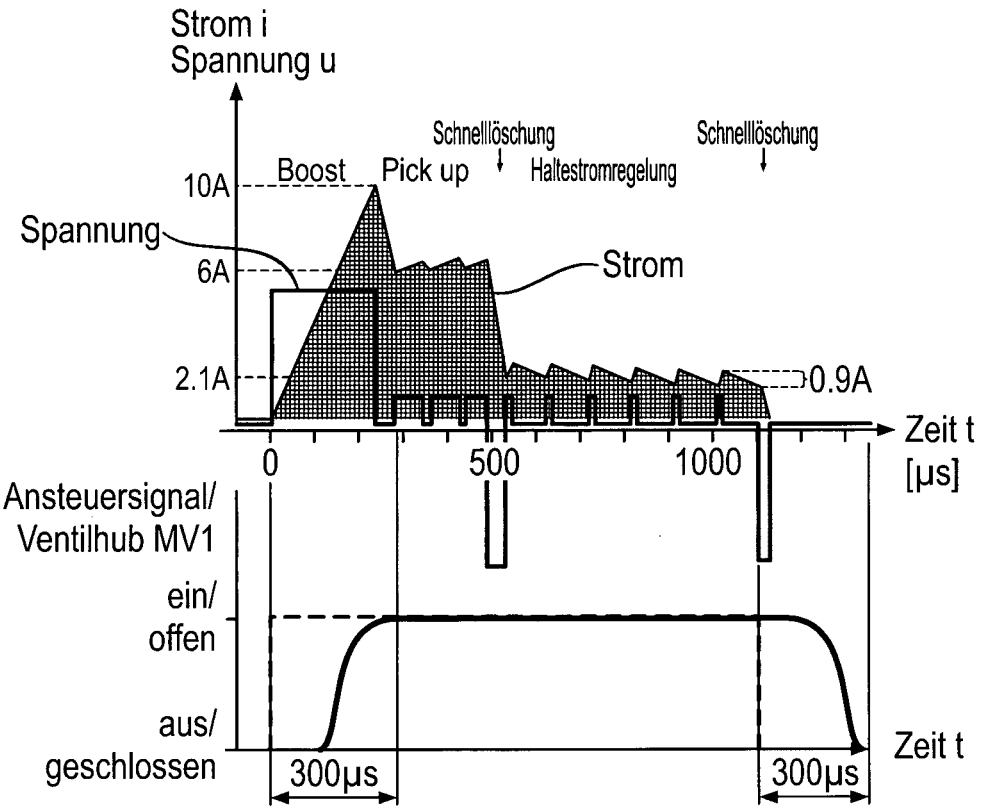

Strom i
Spannung u
Schnelllöschung
Schnelllöschung
Boost
Pick up
Haltestromregelung
10A
Spannung
6A
Strom
2.1A
0.9A
Zeit t
[µs]
0
500
1000
Ansteuersignal/
Ventilhub MV1
ein/
offen
aus/
geschlossen
Zeit t
300µs
300µs

Fig. 11

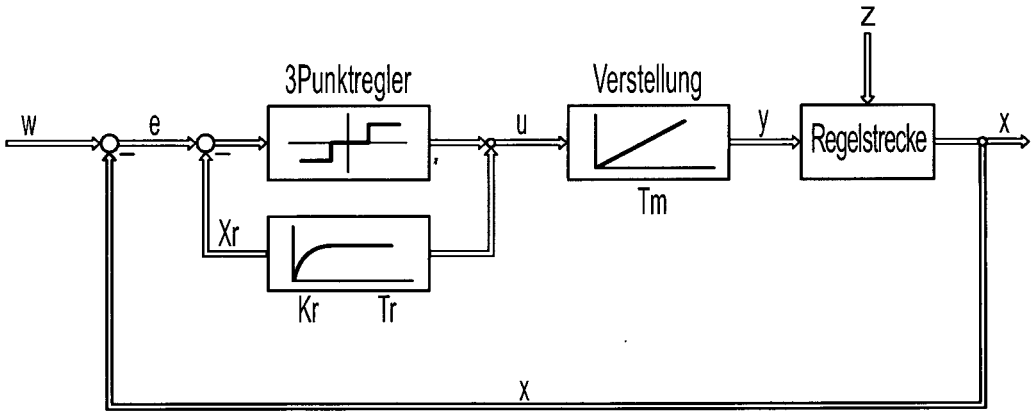

z
3Punktregler
Verstellung
w
e
u
y
Regelstrecke
x
Tm
Xr
Kr
Tr
x

Fig. 13

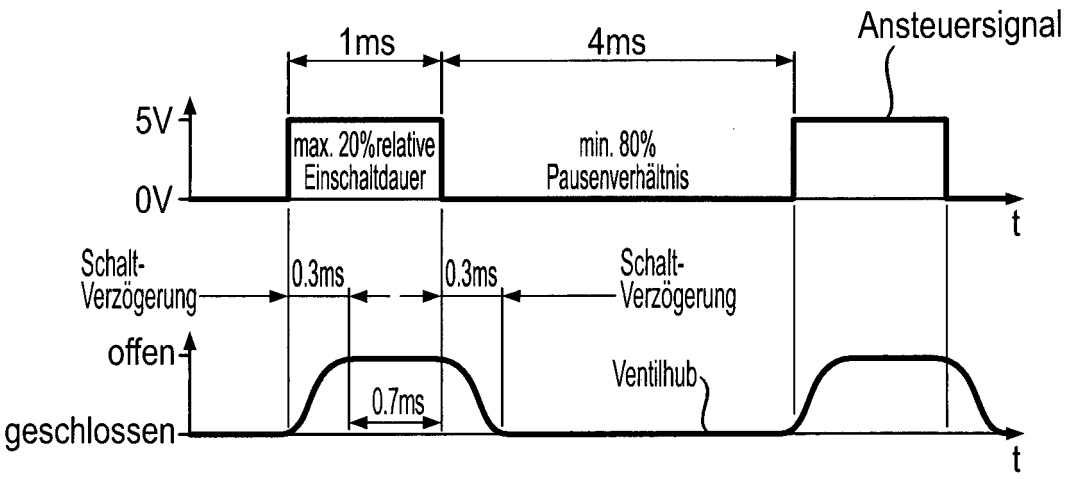

1ms
4ms
Ansteuersignal
5V
0V
max. 20%relative Einschaltdauer
min. 80% Pausenverhältnis
t
Schalt-Verzögerung
0.3ms
0.3ms
Schalt-Verzögerung
offen
geschlossen
0.7ms
Ventilhub
t

Fig. 12

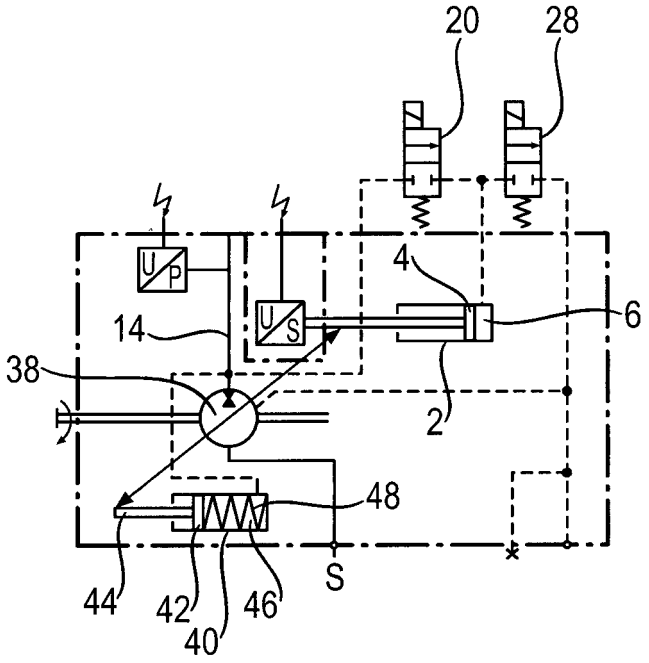

20
28
U/P
U/S
4
6
14
38
2
48
S
44
42
40
46

Fig. 14

## IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

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

### In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente


- DE 102010048070 A1 **[0002]**
- DE 102009052285 A1 **[0085]**