

(19)



(11)

EP 2 376 783 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
15.02.2017 Patentblatt 2017/07

(51) Int Cl.:
F04C 28/02 (2006.01) F04B 49/06 (2006.01)
G05B 17/02 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **09799353.9**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2009/067838

(22) Anmeldetag: **23.12.2009**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2010/072803 (01.07.2010 Gazette 2010/26)

(54) **SIMULATIONSGESTÜTZTES VERFAHREN ZUR STEUERUNG BZW. REGELUNG VON DRUCKLUFTSTATIONEN**

SIMULATION-SUPPORTED METHOD FOR CONTROLLING AND REGULATING COMPRESSED AIR STATIONS

PROCÉDÉ ASSISTÉ PAR SIMULATION POUR LA COMMANDE OU LA RÉGULATION DE STATIONS D'AIR COMPRIMÉ

(84) Benannte Vertragsstaaten:
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 SE SI SK SM TR

• **FREY, Georg**
66123 Saarbrücken (DE)

(30) Priorität: **23.12.2008 DE 102008064491**

(74) Vertreter: **Zech, Stefan Markus et al**
Meissner Bolte Patentanwälte
Rechtsanwälte Partnerschaft mbB
Postfach 86 06 24
81633 München (DE)

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
19.10.2011 Patentblatt 2011/42

(73) Patentinhaber: **KAESER KOMPRESSOREN SE**
96450 Coburg (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A1- 0 431 287 EP-A1- 1 672 454
DE-A1- 19 826 169

(72) Erfinder:
• **WAGNER, Florian**
96486 Lautertal (DE)

EP 2 376 783 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Steuerung bzw. Regelung einer Druckluftstation, die wenigstens eine Mehrzahl von untereinander vernetzten Kompressoren, insbesondere unterschiedlicher technischer Spezifikationen, und optional weitere Geräte der Drucklufttechnik umfasst, welches insbesondere in Steuerzyklen sowohl Schaltstrategien über eine elektronische Anlagensteuerung zur Beeinflussung einer Menge eines für einen oder mehrere Benutzer der Druckluftstation zur Verfügung stehenden Druckfluids in der Druckluftstation veranlassen kann, als auch die für einen oder mehrere Benutzer der Druckluftstation zur Verfügung stehende Menge an Druckfluid auf zukünftige Betriebsbedingungen der Druckluftstation adaptiv auf die Entnahmemenge an Druckfluid aus der Druckluftstation einzustellen vermag.

[0002] Weiterhin betrifft die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Steuerung bzw. Regelung einer Druckluftstation, die wenigstens eine Mehrzahl von untereinander vernetzten Kompressoren, insbesondere unterschiedlicher technischer Spezifikationen, und optional weitere Geräte der Drucklufttechnik umfasst, wobei das Verfahren, welches in einer elektronischen Steuerung einer Druckluftstation implementiert ist, Informationen über wesentliche Zustandsgrößen der Druckluftstation als Eingabeinformation verarbeitet, und Steuerbefehle zur Steuerung von zumindest einigen Kompressoren und optional weiteren Komponenten der Druckluftstation als Ausgabe abgibt, nach dem Oberbegriff von Anspruch 34.

[0003] Darüber hinaus betrifft die vorliegende Erfindung eine Anlagensteuerung einer Druckluftstation.

[0004] Die Verwendung von Druckluftstationen hat sich in vielen industriellen wie auch privaten Umfeldern etabliert. Die Bereitstellung größerer Mengen an Druckfluid sind beispielsweise in industriellen Fertigungsanlagen nicht nur zum Betrieb hydraulischer Vorrichtungen unentbehrlich, sondern etwa auch zur Bereitstellung von Druckfluid an chemische Reaktionsbereiche wie auch physikalische Fertigungsumgebungen zur Verwendung desselben. Druckluftstationen, welche typischerweise wenigstens eine Mehrzahl an Kompressoren, Druckfluidbehältern sowie die entsprechenden Stellmittel und Aktuatoren umfasst, bedürfen oft einer wohldurchdachten und meist komplexen Steuerung, welche in der Lage ist, einer möglicherweise größeren Anzahl von Benutzern an unterschiedlichen Abnehmerstationen der Druckluftstation zu allen gewünschten Zeitpunkten ausreichend Druckfluid zur Verfügung zu stellen. Durch das Vornehmen unterschiedlicher Schalthandlungen werden beispielsweise Ventile auf- oder zugeschaltet, wodurch die An- bzw. Abreicherung von Druckfluid in vorbestimmten Bereichen der Druckluftstation erfolgt, und die Versorgung der Benutzer mit ausreichend Druckfluid gewährleistet werden kann. Weitere mögliche Schalthandlungen betreffen beispielsweise auch das Zu- oder Abschalten einzelner Kompressoren bzw. Kompressorengrup-

pen, oder auch eine im Gegensatz zum diskreten Auf- oder Zuschalten kontinuierliche Regulierung einzelner Aktuatoren oder Stellmittel.

[0005] Um eine vorteilhafte Steuerung der Druckluftstation vornehmen zu können, benötigt die Anlagensteuerung der Druckluftstation Informationen über den Zustand der Druckluftstation. Solche Informationen können durch die Druckluftstation vorbestimmte feste Systemparameter sein, oder auch messbare Zustandsgrößen, wie beispielsweise der Druck, oder auch diskrete bzw. informationstechnische Zustandsgrößen, wie beispielsweise der Betriebszustand eines Kompressors (Stillstand, Leerlauf, Lastlauf), welche Rückschlüsse auf den Zustand der Druckluftstation zu einem bestimmten Zeitpunkt erlauben. Weiterhin sind zur Steuerung der Druckluftstation Randbedingungen zu beachten, deren Einhaltung für den Betrieb der Druckluftstation wünschenswert und mitunter auch unerlässlich sind. Hierunter sind etwa Vorgaben über die Einhaltung von maximal zulässigen Höchstdrücken in dem druckbeaufschlagten Leitungswie auch Druckbehälternetzwerk der Druckluftstation zu zählen, als auch Vorgaben über einen einzuhaltenden Mindestdruck an den Anschlussstationen für Benutzer.

[0006] Aus dem Stand der Technik sind bereits eine Anzahl an Steuerungs- bzw. Regelungsverfahren bekannt, die zur Druckluftstationsteuerung eingesetzt werden. Ein relativ einfaches Steuerungsverfahren, bedient sich einer Kaskadenschaltung, welche jedem Kompressor ein vorbestimmtes Druckband zuordnet. Bei Unterschreitung der unteren Druckbandgrenze wird ein Kompressor zugeschaltet. Bei Überschreitung der oberen Druckbandgrenze wird ein Kompressor entsprechend abgeschaltet. Durch die Überlappung verschiedener Druckbänder der einzelnen von der Druckluftstation umfassten Kompressoren lässt sich ein Mindestdruck einregeln, welcher den Benutzern der Druckluftstation die Entnahme einer gewünschten Menge an Druckfluid aus der Anlage ermöglicht.

[0007] Die DE 198 26 169 A1 beschreibt eine elektronische Steuerung für Aggregate der Druckluft- oder Vakuumerzeugung mit programmierbaren elektronischen Schaltkreisen für die Steuerung, Regelung und Überwachung der technischen Funktion von solchen Aggregaten. Die elektronische Steuerung ist als standardisierte Steuerung für die Verwendung in einer Vielzahl von unterschiedlichen Aggregaten der Druckluft- und/oder Vakuumerzeugung ausgebildet und weist einen durch ein Betriebssystem überwachten und gesteuerten Industrie-PC oder Industrie-Mikro-Computer mit einem oder mehreren Mikroprozessoren und mit einem zentralen Datenspeicher auf, der mindestens Steuerungs- und Regelsoftware und eine Vielzahl von aggregatsspezifischen Datenprofilen enthält, die jeweils für einen bestimmten Aggregatstypen vorgesehen und separat aufrufbar sind.

[0008] Andere Steuerungsverfahren bedienen sich einer Reihenfolgesteuerung, welche eines gemeinsamen vorbestimmten Druckbandes bedarf. Bei Verlassen des Druckbandes wird entsprechend einer zuvor definierten

Reihenfolge ein Kompressor entweder zu- oder abgeschaltet. Bei jedem Schaltvorgang wird ein Timer gestartet, welcher eine vorbestimmte Zeitspanne misst. Sollte der in der Druckluftstation vorherrschende Druck vor Ablauf dieser Zeitspanne nicht das durch das Druckband vorbestimmte Druckregime erreicht haben, wird in zuvor definierter Reihenfolge wiederum ein weiterer Kompressor zu- oder abgeschaltet.

[0009] Eine Weiterentwicklung der Reihenfolgesteuerung wird durch die Druckbandsteuerung begründet. Anstelle des relativ unflexiblen Zu- bzw. Abschaltens einzelner Kompressoren werden Kompressoren in zuvor vorbestimmten Gruppenreihenfolgen zu- bzw. abgeschaltet. Die Auswahl des schaltenden Kompressors innerhalb einer Gruppe erfolgt dabei anhand von heuristischen Regeln, welche sich im Laufe der Zeit als geeignet erwiesen haben, die Betriebskosten einer Druckluftstation zu minimieren.

[0010] All diese Verfahren zur Steuerung von Druckluftstationen sind rein prozessgetrieben. Demnach werden Schalthandlungen an den von der Druckluftstation umfassten Aktuatoren, wie auch Kompressoren lediglich als Reaktion auf zuvor definierte Druckluftereignisse in der Druckluftstation vorgenommen. Hierbei ist jede Aktion der Steuerung der Druckluftstation lediglich eine Reaktion auf ein Ereignis, welches sich in der Gegenwart oder in der Vergangenheit abspielt bzw. abgespielt hat. Erst nach geeigneter Beobachtung dieses Ereignisses kann eine neue Regulierung der Druckfluidverhältnisse in der Druckluftstation erfolgen. Die Reaktion der Steuerung erfolgt deshalb stets nur auf ein Ereignis, welches bei optimaler Steuerung der Druckluftstation hätte abgewendet werden sollen.

[0011] Um eine ausreichend frühzeitige Vornahme von Schaltungshandlungen auslösen zu können, welche dem drohenden Ereignis, dessen Trend sich bereits abzeichnet, entgegenwirken sollen, verwenden manche aus dem Stand der Technik bekannte Steuerungsverfahren eine größere Anzahl von ineinander verschachtelten Druckbändern. Die unterschiedlichen durch die einzelnen Druckbänder definierten Druckbereiche erlauben frühzeitig auch die möglicherweise nur im Ansatz erkennbaren Änderungen der Druckverhältnisse zu definieren und rechtzeitig mit geeigneten Stellhandlungen einem Über- bzw. Unterschreiten eines Maximal- bzw. Minimaldrucks in der Druckluftstation entgegenzuwirken. Jedoch auch derartige Verfahren können nur als rein reaktive Steuerungsverfahren betrachtet werden, da erst bei Vorliegen vorbestimmter Druckverhältnisse in der Druckluftstation eine entsprechende Steuerhandlung vollzogen wird.

[0012] Die in den dargestellten Steuerungsverfahren vorgenommenen Stellhandlungen haben überdem noch Totzeiten aller Stellelemente zu berücksichtigen, um eine Überreaktion auf eine entsprechende Stellhandlung in der Druckluftstation zu verhindern. Dementsprechend erfolgt die Berechnung neuer Stellhandlungen lediglich nach einer durch die Totzeiten der Stellelemente beding-

te typische Verzögerungszeit. Auf diese Weise lässt sich jedoch nicht vermeiden, dass die Auswirkung einer vorgenommenen Stellhandlung nur dann beobachtet werden kann, wenn der Zustand in der Druckluftstation neu bewertet und durch die Berechnung einer neuen Reaktion durch weitere Stellhandlungen vorgenommen wird. Folglich kommt es zu einer künstlichen Verringerung der Reaktionsgeschwindigkeit der Steuerung, was sich nachteilig auf die Steuerungsgüte der Druckluftstation auswirkt.

[0013] Die aus dem Stand der Technik bekannten Steuerungsverfahren erlauben überdies nur eine Berücksichtigung von Randbedingungen, soweit diese explizit bei der Parametrierung der Steuerungsberechnungen besichtigt werden können. Die Zusammenhänge vieler physikalischer Variablen der Druckluftstationen können jedoch nur durch Angaben von empirischen Regeln parametrieren werden, welche lediglich rein heuristische Verhältnisse in möglicherweise überdies nur äußerst beschränkten Druckregimen darstellen. So ist beispielsweise bekannt, dass in vielen Fällen (nicht in allen) durch das Herabsetzen des zulässigen Höchstdruckes der Druckluftstation eine Energieeinsparung erzielt werden kann. Überdies hat es sich zur Senkung der Energiekosten auch als vorteilhaft bewährt, kleine vor großen Kompressoren bzw. Kompressorengruppen zu- oder abzuschalten. Die Implementierung derartiger Erkenntnisse in einem Steuerungsverfahren für Druckluftstationen gestaltet sich jedoch sehr schwierig und in vielen Fällen als unmöglich, da durch die Überlagerung unterschiedlicher Parametereinstellungen sich gegensätzliche Wirkungsweisen auf eine zu beeinflussende Randbedingung ergeben können, wodurch die heuristische Parametrierung eine für den Anlagenbetreiber nicht wünschenswerte Komplikation darstellt.

[0014] Der vorliegenden Erfindung liegt nun die Aufgabe zugrunde, ein Steuerungsverfahren für Druckluftstationen vorzuschlagen, welches die Nachteile der aus dem Stand der Technik bekannten Lösungsansätze vermeidet. Insbesondere soll das erfindungsgemäße Steuerungsverfahren erlauben, möglichst frühzeitig Veränderungen des Drucks in der Druckluftstation vorherzusehen, um geeignete Schalthandlungen in die Wege zu leiten.

[0015] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren zur Steuerung einer Druckluftstation gemäß Patentansprüchen 1 und 35 bzw. durch eine Anlagensteuerung einer Druckluftstation gemäß Patentanspruch 37 gelöst.

[0016] Insbesondere wird die Aufgabe durch ein Verfahren zur Steuerung einer Druckluftstation gelöst, die wenigstens eine Mehrzahl von untereinander vernetzten Kompressoren, insbesondere unterschiedlicher technischer Spezifikationen, und optional weitere Geräte der Drucklufttechnik umfasst, welches insbesondere in Steuerzyklen sowohl Schaltstrategien über eine elektronische Anlagensteuerung zur Beeinflussung einer Menge eines für einen oder mehrere Benutzer der Druckluftstation jederzeit zur Verfügung stehenden Druckfluids in der

Druckluftstation veranlassen kann, als auch die für einen oder mehrere Benutzer der Druckluftstation jederzeit zur Verfügung stehende Menge an Druckfluid auf zukünftige Betriebsbedingungen der Druckluftstation adaptiv auf die Entnahmemenge an Druckfluid aus der Druckluftstation einzustellen vermag, wobei vor Veranlassung einer Schaltstrategie verschiedene Schaltstrategien in einem Voraussimulationsverfahren unter Zugrundelegung eines Modells der Druckluftstation überprüft werden und aus den überprüften Schaltstrategien anhand mindestens eines festgelegten Gütekriteriums die relativ vorteilhafteste Schaltstrategie ausgewählt wird und die ausgewählte Schaltstrategie an die Anlagensteuerung zur Veranlassung in der Druckluftstation weitergeleitet wird.

[0017] Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass die Kompressoren sowie die anderen optional von der Druckluftstation umfassten Geräte der Drucklufttechnik nicht ausschließlich durch die Anlagensteuerung sondern in Teilaspekten (z.B. Sicherheitsabschaltungen, Durchführung einfacher Schaltsequenzen nach Änderung externer Stellgrößen) auch durch interne Steuerungs- bzw. Regelungseinrichtungen gesteuert bzw. geregelt werden können.

[0018] Weiterhin wird die Aufgabe durch ein Verfahren zur Steuerung bzw. Regelung einer Druckluftstation, die wenigstens eine Mehrzahl von untereinander vernetzten Kompressoren, insbesondere unterschiedlicher technischer Spezifikationen, und optional weitere Geräte der Drucklufttechnik umfasst, wobei das Verfahren, welches in einer elektronischen Steuerung einer Druckluftstation implementiert ist, Informationen über wesentliche Zustandsgrößen der Druckluftstation als Eingabeinformation verarbeitet, und Steuerbefehle zur Steuerung von zumindest einigen Kompressoren und optional weiteren Komponenten der Druckluftstation als Ausgabe abgibt, wobei das Verfahren folgende Funktionsstrukturen aufweist: einen Simulationskern, in dem zur Beschreibung des Verhaltens zumindest einiger Komponenten der Druckluftstation dynamische und vorzugsweise nichtlineare Modelle dieser Komponenten enthalten sind, wobei der Simulationskern so konfiguriert ist, dass er als Simulationsergebnis den Zeitverlauf aller im Modell enthaltenen Zustandsgrößen der Komponenten der Druckluftstation auf Basis angenommener alternativer Schaltstrategien vorausberechnet, wobei die Modelle des Simulationskerns die wesentlichen Nichtlinearitäten und/oder Unstetigkeiten und/oder Totzeiten im Verhalten der Komponenten, insbesondere der Kompressoren, berücksichtigen; einen Algorithmenkern, der Parameter zur Charakterisierung der Komponenten der Druckluftstation, Informationen über die Verschaltung der einzelnen Komponenten, Heuristiken zur Bildung alternativer Schaltstrategien und Bewertungskriterien für die vom Simulationskern ermittelten Zeitverläufe der Zustandsgrößen der Komponenten der Druckluftstation für die alternativen Schaltstrategien enthält, und der auf dieser Basis die relativ vorteilhafteste Schaltstrategie auswählt und entsprechende Steuerbefehle an zumindest einige Kom-

pressoren bereit hält bzw. übergibt; und eine Informationsbasis, die neben einem aus Sensorwerten und ggf. vom Algorithmenkern bereitgestellten Aktuatorwerten gebildeten Prozessabbild auch die Simulationsergebnisse für alternative Schaltstrategien enthält, wobei die Informationsbasis zumindest einen Teil der gemeinsamen Datenbasis von Algorithmen- und Simulationskern darstellt und dem Datenaustausch zwischen Algorithmen- und Simulationskern dient.

[0019] Ausführungsgemäß kann die Informationsbasis ein Prozessabbild der Druckluftstation, also im Wesentlichen die Messwerte von Zustandsgrößen und die aktuellen Stellgrößen, ergänzt um die Voraussimulationsergebnisse der Zeitverläufe der Zustandsgrößen für verschiedene Szenarien enthalten. Der Algorithmenkern kann ferner die Informationen über die Konfiguration der Druckluftstation sowie den darin enthaltenen Komponentenarten und deren Parameter enthalten. Außerdem kann er Heuristiken für die Bildung unterschiedlicher zu untersuchender Szenarien aufweisen. Der Algorithmenkern übergibt dann typischerweise diese Informationen an den Simulationskern. Weiterhin übergibt der Algorithmenkern typischerweise dem Simulationskern die aus der Informationsbasis stammenden und für die Voraussimulation relevanten Zustandsinformationen der Druckluftstation. Der Simulationskern kann hierbei Modelle für die üblichen Komponenten einer Druckluftstation aufweisen. Er vermag ferner aus diesen Modellen unter Verwendung der vom Algorithmenkern erhaltenen Informationen über die Struktur der Druckluftstation und die darin enthaltenen Komponentenarten und deren Parameter ein Modell der Druckluftstation zu bilden, das er mit weiteren Informationen über den aktuellen Zustand der Druckluftstation aus der Informationsbasis komplettiert. Auf dieser Basis kann der Simulationskern typischerweise über den Voraussimulationszeitraum den zeitlichen Verlauf aller Zustandsgrößen des Modells der Druckluftstation simulieren und legt diese in der Informationsbasis ab. Außerdem kann der Simulationskern dem Algorithmenkern Statusmeldungen im Zusammenhang mit der Durchführung der Voraussimulationen liefern.

[0020] Auf Basis der vom Simulationskern in der Informationsbasis abgelegten alternativen Zeitverläufe aller Zustandsgrößen des Modells der Druckluftstation kann der Algorithmenkern ferner für die untersuchten Szenarien diese bewerten und wählt gemäß des Gütekriteriums das relativ vorteilhafteste Szenario aus und übermittelt die zugehörigen Schaltstrategien an die Komponenten der Druckluftstation, bzw. hält diese Schaltstrategie zum Abruf bereit. Folglich ist der Simulationskern als relativ umfangreicher und komplexer Teil der Implementierung unabhängig von der konkreten Druckluftstation, d.h. universell verwendbar. Sinnvollerweise kann die Modellierung und Beschreibung auch mit objektorientierten Softwaremethoden erfolgen.

[0021] Weiterhin wird die Aufgabe durch eine Anlagensteuerung einer Druckluftstation gelöst, die eine Mehrzahl von untereinander vernetzten Kompressoren, ins-

besondere unterschiedlicher technischer Spezifikationen, und optional weitere Geräte der Drucklufttechnik umfasst, welche insbesondere in Steuerzyklen sowohl Schaltstrategien von Stellelementen der Druckluftstation und/oder unterschiedlicher Kompressoren zur Beeinflussung der Menge des für einen oder mehrere Benutzer der Druckluftstation jederzeit zur Verfügung stehenden Druckfluids in der Druckluftstation veranlassen kann, als auch die für einen oder mehrere Benutzer der Druckluftstation jederzeit zur Verfügung stehende Menge an Druckfluid auf zukünftige Betriebsbedingungen adaptiv auf die Entnahmemenge an Druckfluid aus der Druckluftstation einzustellen vermag, wobei vor Vornahme einer Schaltstrategie verschiedene Schaltstrategien in einem in Echtzeit ausgeführten Voraussimulationsverfahren unter Zugrundelegung eines Modells der Druckluftstation überprüft werden und aus den Schaltstrategien anhand mindestens eines festgelegten Gütekriteriums eine relativ vorteilhafte Schaltstrategie ausgewählt wird und die Anlagensteuerung aufgrund der ausgewählten Schaltstrategie einen Schaltbefehl erzeugt.

[0022] Ein der Erfindung zugrundeliegender Hauptgedanke besteht darin, unterschiedliche Schaltstrategien, etwa vergleichbar unterschiedlichen Szenarien an Schalthandlungen, mit Hilfe eines Voraussimulationsverfahrens zu berechnen, welches erlaubt, das Verhalten der gesamten Druckluftstation, bzw. auch einzelner Teilkomponenten davon, entsprechend zu simulieren. Dementsprechend wird keine Optimierungsrechnung ausgeführt, welche etwa den Wert eines die Druckluftstation beschreibendes Funktionals im mathematischen Sinne optimieren würde, sondern es werden lediglich eine Anzahl an Szenarien der Druckluftstation für unterschiedliche Bedingungen bestimmt.

[0023] Unter einem Szenario soll hier ein angenommener oder prognostizierter Verlauf von Störgrößen, insbesondere des Druckluftverbrauches, in Verbindung mit einer zu untersuchenden Schaltstrategie verstanden werden. Eine Schaltstrategie soll weiterhin als eine Abfolge von Schalthandlungen, d.h. eine diskrete oder kontinuierliche Änderung von Stellgrößen verstanden werden, welche eine Änderung des Betriebes einer oder mehrerer Komponenten der Druckluftstation bewirken. Hierzu sind etwa ein Umschalten zwischen einem Lastlauf und einem Leerlauf oder einem Stillstand sowie gestufte oder kontinuierliche Veränderungen der Drehzahl oder des Drossel- bzw. Abblasezustandes von Kompressoren zu rechnen, und schließt auch Änderungen von Parametereinstellungen an Kompressoren oder anderen optionalen Komponenten der Druckluftstation mit ein.

[0024] Schalthandlungen sollen im Folgenden zudem nicht nur als einzelne diskrete Schaltaktionen verstanden werden, sondern auch im Sinne einer Schaltstrategie als zeitliche gestaffelte Abfolge von Schaltaktionen. Zudem umfasst der Begriff der Schalthandlung nicht nur diskrete Änderungen eines Betriebszustandes von Komponenten (beispielsweise das Umschalten zwischen Stillstand, Leerlauf und Lastbetrieb), sondern auch kontinuierliche

Änderungen, beispielsweise die zeitliche Veränderung der Drehzahl eines drehzahlveränderlichen Kompressors oder das kontinuierliche Schließen oder Öffnen von Ventilen.

[0025] Ein deutlicher Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens im Gegensatz zu Verfahren, welche etwa auf der Optimierung eines eine Druckluftstation beschreibendes Funktionals beruhen, um eine optimale Steuerung der Druckluftstation über einen vorbestimmten Zeitbereich zu bewirken, besteht darin, dass die Implementierung von komplexen, nichtlinearen, zeitabhängigen und ggf. unstetiger Modellen relativ einfach möglich ist, weil die implementierten Modelle nicht mit mathematischen Methoden auf eine analytische Form gebracht werden müssen, in der sie einer Optimierungsrechnung zur Bestimmung optimaler Stellgrößen zugänglich gemacht wird. Auch mit Optimierungsrechnungen verbundene Einschränkungen, etwa konstante Stör- und Stellgrößen in einem Zeitschritt, stellen für das erfindungsgemäße Verfahren keine Einschränkungen dar.

[0026] Das erfindungsgemäße Voraussimulationsverfahren wird dabei auf Grundlage eines Modells der Druckluftstation ausgeführt, welches entsprechend der Anzahl und Art der im Modell der Druckluftstation implementierten Komponenten parametrisiert und beschrieben werden kann. Unter Parameter sind typischerweise Kenngrößen zu verstehen, die baulich bedingte Eigenschaften (vorliegend also etwa die Anzahl der Druckbehälter, Aktuatoren, oder Kompressoren, elektrische Eigenschaften der Antriebsmotoren, Volumina von Leitungen und Druckbehältern, Beschaffenheit der von der Druckluftstation umfassten Druckleitungen, etc.) oder vorgegebene Einstellungen (programmierte Schaltverzögerungen etc.) beschreiben und in die Modellbildung mit integriert sind. Parameter weisen typischerweise keine zeitliche Veränderung auf, können aber unter Umständen nachgeführt und/oder adaptiv angepasst werden, um etwa Verschleiß von einzelnen Komponenten zu berücksichtigen.

[0027] Modelle bedürfen zur Beschreibung neben Parametern, die Geräte in einer baulichen oder auch funktionellen Weise beschreiben, auch noch Zustandsgrößen, welche momentane Werte von einzelnen Komponenten oder die Druckluftstation beschreibende physikalische Vorgänge sind. Darunter sind etwa die elektrische Leistungsaufnahme, der produzierte Druckvolumenstrom, interne Drücke, Drehzahlen von Antriebsmotoren, Verdichterelemente oder Lüftermotoren, Stellungen von Aktuatoren und dergleichen zu rechnen. Hierbei ist jedoch hervorzuheben, dass etwa Kompressoren relevante Zustandsgrößen aufweisen, deren Werte sich nicht aus den aktuellen Werten von Stör- oder Stellgrößen ergeben, sondern aus dem zurückliegenden Zeitverlauf, weshalb geeignete Modelle auch zurückliegende Ereignisse mit berücksichtigen müssen. Folglich ist zur Erstellung eines Modells der Druckluftstation bzw. einzelner Komponenten ein dynamischer Ansatz mit "Gedächtnis" vorteilhaft, welcher durch das erfindungsgemäße Ver-

fahren besonders leicht zu verwirklichen ist.

[0028] Der Aufbau von Modellen zur Beschreibung der Druckluftstation oder einzelner Komponenten hiervon zeigt sich besonders im Falle einer objektorientierten Implementierung als überaus vorteilhaft. Das auf diese Modelle angewandte Voraussimulationsverfahren kann zudem auch weitgehend unabhängig von der Struktur der konkreten Druckluftstation, bzw. der dafür erstellten Modelle ausgeführt werden.

[0029] Als Ergebnisse in dem Voraussimulationsverfahren werden typischerweise die Zeitverläufe der, vorzugsweise aller in einem Modell enthaltenen Zustandsgrößen von Kompressoren oder weiteren von der Druckluftstation optional umfassten Geräten der Drucklufttechnik berechnet. Hierzu sind etwa Zeitverläufe der die Druckluftstation im gewählten Modell beschreibenden Zustandsgrößen im Voraussimulationszeitraum, beispielsweise Druckverläufe, elektrische Leistungsaufnahmen, Druckluftvolumenströme, Drehzahlen von Antriebsmotoren, Verdichterelemente oder Lüftermotoren oder Stellungen von internen Aktuatoren zu fassen. Anschließend werden diese Ergebnisse für jede alternative Schaltstrategie durch ein Gütekriterium bewertet, wodurch eine Präferenzordnung erstellt werden kann. Die Schaltstrategie, welche aus einer Reihe an untersuchten Schaltstrategien schließlich an erster Stelle der Präferenzordnung steht, wird als relativ vorteilhafteste Schaltstrategie ausgewählt und entsprechend bereit gehalten bzw. veranlasst. Hierbei muss eine ausgewählte, relativ vorteilhafteste Schaltstrategie nicht bis zum Ende des Voraussimulationszeitraumes beibehalten werden, sondern kann bereits im nächsten Steuerzyklus durch ggf. ermittelte günstigere Schaltstrategien ersetzt werden. Auch die Länge des bei der Auswertung des Gütekriteriums berücksichtigten Voraussimulationszeitraumes kann variabel sein und ggf. vom Steuerungsverfahren an Verläufe von Störgrößen, Stellgrößen und/oder Zustandsgrößen insbesondere adaptiv angepasst werden.

[0030] Ein wesentlicher Punkt der Erfindung liegt ferner auch darin, dass das Steuerungs- bzw. Regelungsverfahren Zeitverzögerungen (Totzeiten) bzw. sich sprunghaft ändernde Zustandsgrößen (Unstetigkeiten) geeignet mit in der Voraussimulation berücksichtigen kann, so etwa eine sprunghaft einsetzende Abgabe von Druckluft eines Kompressors nach dem Umschalten von Stillstand bzw. Leerlauf in den Lastbetrieb. Aufgrund der auftretenden Totzeiten und Unstetigkeiten, deren Zeitverzögerung größer als die Dauer der Steuerzyklen sein kann, bedarf es nicht nur einer Berücksichtigung der Auswirkungen von Schalthandlungen am Anfang des aktuellen Steuerzyklus auf die Verläufe der Zustandsgrößen in einem aktuellen Steuerzyklus, sondern auch eine Berücksichtigung der Auswirkungen von Schalthandlungen innerhalb von Steuerzyklen, in zurückliegenden Steuerzyklen und die Auswirkungen von Schalthandlungen auf zukünftige Steuerzyklen. Eine derartige zeitlich ganzheitliche Betrachtungsweise ist mit dem vorliegenden Ver-

fahren besonders leicht zu verwirklichen. Erst durch eine solche Betrachtungsweise wird aber eine realitätsnahe, d.h. insbesondere den Druckverlauf und den Energieverbrauch mit hoher Genauigkeit nachbildende Modellierung von Druckluftstationen möglich.

[0031] Im Gegensatz zu bekannten Steuerungs- und Regelungsverfahren können mit dem vorliegenden Steuerungs- und Regelungsverfahren also auch Schaltstrategien untersucht werden, deren Schalthandlungen innerhalb des Voraussimulationszeitraumes erfolgen. Hierdurch kann auch ermittelt werden, zu welchem relativ günstigsten Zeitpunkt bestimmte Schalthandlungen ausgeführt werden sollten. Zudem hat das erfindungsgemäße Verfahren auch den großen Vorteil, innerhalb des Voraussimulationszeitraumes variable zeitliche Verläufe von Störgrößen berücksichtigen zu können. Bei Verwendung geeigneter Prognosen für die Störgrößen, beispielsweise des zeitlichen Verlaufs der Druckluftentnahme aus der Druckluftstation, wird eine Voraussimulation mit verbesserter Genauigkeit über längere Zeiträume möglich und damit auch eine bessere Bewertung der Auswirkungen von Schalthandlungen.

[0032] Ein weiterer Erfindungsgedanke besteht in einer Erweiterung der Informationsbasis aufgrund der Durchführung des Voraussimulationsverfahrens. Die durch die Voraussimulation gewonnenen Erkenntnisse (Simulationsergebnisse) stellen einen Satz an Informationen dar, die sich auf zukünftige Zustandsveränderungen der Druckluftstation beziehen, wobei auch noch weitere Randbedingungen berücksichtigt werden können. Die Anlagensteuerung der Druckluftstation kann folglich nicht nur auf aktuell bekannte Prozesswerte zurückgreifen, sondern hat vielmehr auch Erkenntnisse über zukünftige Auswirkungen und Zustände von Stell- oder Schalthandlungen, welche in der Vergangenheit oder in der Gegenwart bereits vorgenommen wurden. Zugleich erlaubt die Voraussimulation auch Informationswerte zu erzeugen, die sich erst auf zukünftige Schaltstrategien beziehen. Damit unterscheidet sich das vorliegende Steuerungsverfahren als "agierendes" Steuerungsverfahren im Gegensatz zu den aus dem Stand der Technik bekannten "reagierenden" Steuerungsverfahren. Erst das Durchführen der Voraussimulation erlaubt auch virtuelle Druckereignisse zu definieren, welche sich auf Ereignisse beziehen, die in der Voraussimulation auftreten, aber nicht durch aktuelle Messwerte der realen Druckluftstation motiviert sind. Das Abwenden unerwünschter Ereignisse in der Druckluftstation, welche erst zukünftig auftreten, erlaubt somit das frühzeitige jedoch nicht verfrühte Steuern der realen Druckverhältnisse in der Druckluftstation.

[0033] In Verbindung mit mindestens einem festgelegten Gütekriterium erlaubt das Voraussimulationsverfahren die Bewertung verschiedener alternativer Schaltstrategien zur Steuerung der Druckluftstation. Hierbei können mehrere (prinzipiell beliebig viele) Varianten von Schaltstrategien in der Voraussimulation berechnet werden, um somit die Reaktion der Druckluftstation auf die

veranlassten Schaltstrategien zu ermitteln und bewerten zu können. Gemäß der Definition des Gütekriteriums kann aus einer Menge von alternativen Schaltstrategien diejenige gewählt werden, die unter vorbestimmten Randbedingungen das relativ vorteilhafteste Resultat liefert. Hierbei ist es nicht nur möglich, die Schaltstrategien für einen vorbestimmten nächsten Ausschaltzeitpunkt zu simulieren, sondern die Schaltstrategien können praktisch beliebig weit in die simulierte Zukunft reichen. Es können überdies auch Folgen von Schaltstrategien in der Simulation verarbeitet werden, welche die Bewertung von aufeinander aufbauenden Schaltstrategien ermöglicht. Neben dem Testen verschiedener Schaltstrategien können zudem auch verschiedene Randbedingungen vorab simuliert werden. Durch Variation der Randbedingungen können beispielsweise Schaltstrategien für die Aktuatoren ermittelt werden, die in möglichst vielen zu erwartenden Szenarien die Bedingungen am relativ vorteilhaftesten (oder zumindest zufriedenstellend) erfüllen.

[0034] In einer vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird das Voraussimulationsverfahren zur Überprüfung jeweils einer Schaltstrategie schneller als es der simulierten Zeitspanne entspricht, und vorzugsweise in kürzerer Zeit als der Dauer eines Steuerzykluses ausgeführt. Eine derartige Berechnungsgeschwindigkeit erlaubt die Voraussimulation einer Vielzahl von Schaltstrategien aus welcher dann eine relativ vorteilhafteste mittels eines Gütekriteriums ausgewählt werden kann.

[0035] In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens umfasst das Voraussimulationsverfahren zur Überprüfung jeweils einer Schaltstrategie insbesondere den zeitlichen Verlauf von in dem Modell der Druckluftstation enthaltenen Zustandsgrößen für die Zeitspanne der Voraussimulation. Der zukünftige Verlauf der Zustandsgrößen erlaubt eine Vergrößerung der Informationsbasis auf welcher Grundlage eine genauere und verbesserte Steuerung bzw. Regelung ermöglicht wird.

[0036] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens basiert das Modell der Druckluftstation auf einem Satz von zeitabhängigen und/oder nichtlinearen sowie zur Nachbildung von Unstetigkeiten und/oder Totzeiten im Verhalten der Kompressoren und/oder optionaler weiterer Geräte der Drucklufttechnik vorzugsweise strukturvarianten Differentialgleichungen, die insofern vorzugsweise auch die Erfassung der Auswirkung zurückliegender Ereignisse auf die aktuellen Zustandsgrößen der Druckluftstation erlauben. Unter Strukturvarianz soll dabei verstanden werden, dass aus dem Satz von Differentialgleichungen fallweise nur eine wechselnde Untermenge berücksichtigt wird. Dies spielt insbesondere für die Nachbildung der Unstetigkeiten und/oder Totzeiten im Verhalten der Kompressoren und/oder optionalen Geräte der Drucklufttechnik eine Rolle, weil deren Verhalten in verschiedenen Betriebszuständen bzw. beim Übergang zwischen verschiedenen Betriebszuständen meist durch unterschied-

liche bzw. wechselnde Differentialgleichungen beschrieben werden kann bzw. muss. Die Auswahl der jeweils zu berücksichtigenden Differentialgleichungen kann dabei durch die Differentialgleichung selbst oder durch externe Vorgabe erfolgen. Obwohl die Differentialgleichungen in einer besonders bevorzugten Ausführungsform zeitabhängig, nichtlinear und strukturvariant sind, müssen diese Eigenschaften nicht zwingend alle gemeinsam bzw. nicht zugleich für alle Differentialgleichungen erfüllt sein. Beispielsweise können statt nichtlinearer Differentialgleichungen auch eine Mehrzahl von stückweise bzw. zeitabschnittsweise linearen Differentialgleichungen als Approximation verwendet werden, es können einige Differentialgleichungen zeitabhängig sein, während die anderen nicht zeitabhängig sind, es können einige Differentialgleichungen linear sein, während die anderen nichtlinear sein, und/oder es können einige Differentialgleichungen immer, andere nur fallweise berücksichtigt werden.

[0037] In einer vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens kann vorgesehen sein, dass innerhalb des Voraussimulationsverfahrens eine Entwicklung der verschiedenen Schaltstrategien über eine vorbestimmte Zeitspanne in diskreten oder kontinuierlichen Schritten berechnet wird. Die Länge der Zeitspanne kann dabei beispielsweise extern durch einen Bediener der Druckluftstation vorgegeben werden oder auch fest parametrisiert sein. Die Länge der Zeitspanne kann zudem auch adaptiv an die Ereignisse in der Druckluftstation angepasst werden. Damit lässt sich die Anlagensteuerung auf in einer Druckluftstation typischerweise auftretende Periodendauern spezifischer Schwankungen der Druckverhältnisse einstellen.

[0038] In einer Weiterführung des Steuerungsverfahrens kann vorgesehen sein, dass die Voraussimulation über eine vorbestimmte Zeitspanne von 1 sec bis 1000 sec, vorzugsweise von 10 Sekunden bis 300 Sekunden durchgeführt wird. Eine Zeitspanne dieser Länge erlaubt typischerweise die durch die Veranlassung von Schaltstrategien in der Druckluftstation bewirkten Änderungen und Schwankungen der Druckverhältnisse sicher zu erfassen, als auch eine für die meisten Anwendungen ausreichende Voraussimulationsspanne zu gewährleisten.

[0039] In einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist vorgesehen, dass die Zeitspanne der Voraussimulation durch ein Abbruchkriterium auf Basis von Parametern und/oder Zustandsgrößen des Modells der Druckluftstation, insbesondere von Druckereignissen, und/oder von Aufzeichnungen oder Prognosen des Druckverbrauchs adaptiv angepasst wird. Damit kann eine vorteilhafte Anpassung der Dauer der Voraussimulation an den Verlauf des Druckluftverbrauchs erfolgen und erlaubt folglich eine schnellere bzw. umfänglichere Voraussimulation.

[0040] In einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist vorgesehen, dass die mit dem Voraussimulationsverfahren überprüften

Schaltstrategien diskrete oder kontinuierliche Änderungen des Betriebszustandes von Kompressoren und optional von weiteren Geräten der Druckluftstation am Anfang, am Ende und/oder zu beliebigen Zeitpunkten innerhalb der Zeitspanne der Voraussimulation umfassen. Damit erlaubt das ausführungsgemäße Verfahren die Berücksichtigung der Änderungen von Stell- oder Störgrößen innerhalb einer simulierten Zeitspanne und ermöglicht folglich eine realistischere Berücksichtigung des Zeitverlaufs dieser Größen.

[0041] Weiterhin kann vorgesehen sein, dass die Länge der simulierten Zeitspanne des Voraussimulationsverfahrens in Abhängigkeit von den technischen Leistungsdaten der Kompressoren der Kompressorenanlage und/oder in Abhängigkeit der aktuellen Last einzelner Kompressoren und/oder zurückliegender Lastschwankungen bestimmt wird. Je nach Konfiguration der Druckluftstation kann damit die Länge der Voraussimulation so eingeschränkt werden, dass die zur Berechnung der Ergebnisse der Voraussimulation nötigen Rechenressourcen möglichst vorteilhaft genutzt werden. Vorzugsweise ist die Länge der simulierten Zeitspanne dabei so bemessen, dass sie länger als die kürzesten typischerweise auftretenden Lastschwankungen der Druckluftstation ist.

[0042] Ausführungsgemäß kann überdies vorgesehen sein, dass die Voraussimulation in diskreten Schritten von 0,1 Sekunden bis 60 Sekunden, vorzugsweise von 1 Sekunde, durchgeführt wird. Gemäß dieser Schrittweite können auch unmittelbare Veränderungen der Druckverhältnisse in der Druckluftstation etwa nach Vornehmen einer Schalthandlung in der Voraussimulation sicher erfasst werden unter gleichzeitigem ökonomischen Einsatz der von der Anlagensteuerung verwendeten Rechenressourcen.

[0043] In einer weiterführenden Ausführungsform kann sich das Verfahren zur Steuerung einer Druckluftstation auch dadurch auszeichnen, dass innerhalb der Voraussimulation zumindest einige der Unstetigkeiten und/oder Totzeiten im Verhalten der Kompressoren und/oder optionaler weiterer Geräte der Drucklufttechnik, insbesondere die verzögert eingesetzte Druckluftabgabe und der zusätzliche Energieverbrauch der Kompressoren im Zusammenhang mit Änderungen ihres Betriebszustandes, berücksichtigt werden, derart, dass eine separate Berücksichtigung außerhalb der Voraussimulation in der Anlagensteuerung nicht mehr zwingend erforderlich ist. Die in einer Druckluftstation vorhandenen Aktuatoren verfügen über typische Totzeiten, welche im Bereich zwischen 1 Sekunde bis zu mehreren 10 Sekunden liegen. Entgegen der aus dem Stand der Technik bekannten Steuerungsverfahren ist es vorliegend möglich, die effektiven Totzeiten sowie andere Unstetigkeiten in der Voraussimulation zu berechnen, und damit diese Größen bei der Berechnung der Schalthandlungen mit zu berücksichtigen. Voraussetzung für die Berücksichtigung der Totzeiten ist jedoch, dass das verwendete Modell der Druckluftstation das Totzeitverhalten in parame-

trisierte Form enthält. Folglich ist es also nicht mehr notwendig, die Totzeiten der Aktuatoren in der Anlagensteuerung selbst zu berücksichtigen. Das Überwinden der Totzeiten liegt gleichsam automatisch in den Ergebnissen der Voraussimulation vor. Dies ermöglicht einerseits herauszufinden, ob die in der Vergangenheit durchgeführten Stellhandlungen ausreichend waren, um unerwünschte Druckverläufe abzuwenden, andererseits kann überprüft werden, ob durch in der Gegenwart eingeleitete Stellhandlungen das zeitliche Verhalten der Druckverhältnisse in der Druckluftstation überhaupt positiv beeinflusst werden kann.

[0044] In einer weiteren Ausführung des vorliegenden Steuerungsverfahrens kann vorgesehen sein, dass als Gruppe von alternativen Schaltstrategien unterschiedliche obere Druckwerte oder untere Druckwerte als Kriterium für die Veranlassung einer zuvor festgelegten Schaltstrategie im Rahmen des Voraussimulationsverfahrens betrachtet werden. Im Gegensatz zur herkömmlichen, aus dem Stand der Technik bekannten Druckbandsteuerung sind die Druckwerte vorliegend nicht fest, sondern können an die Verhältnisse in der Druckluftstation angepasst werden. Die Ermittlung der Druckwerte kann zudem selbst mittels des Voraussimulationsverfahrens erfolgen. Die Festlegung geeigneter oberer und unterer Druckwerte kann sich aus vielfach wiederholten Voraussimulationen mit jeweils voneinander abweichenden Druckwerten bestimmen lassen. Sind etwa derartige Druckwerte zunächst vorab bestimmt, können diese in festgelegter Weise die Grundlage für die Berechnung unterschiedlicher Simulationen darstellen, in welchen die Druckwerte selbst unveränderlich bleiben, jedoch Variablen, wie beispielsweise durch Schalthandlungen charakterisierte Stellgrößen, abgeändert werden. Somit kann auf eine Zustandsänderung in der Druckluftstation, welche keine neue Festlegung der oberen Druckwerte erfordert, dadurch eine möglichst vorteilhafte Schaltstrategie ermittelt werden, dass lediglich eine vorbestimmte Anzahl an die Stellhandlungen charakterisierenden Stellgrößen in dem Voraussimulationsverfahren ermittelt werden.

[0045] In einer Weiterführung kann überdies vorgesehen sein, dass als Gruppe von alternativen Schaltstrategien unterschiedliche obere Druckwerte und/oder untere Druckwerte für mindestens eine zuvor festgelegte Abschaltstrategie bzw. mindestens eine zuvor festgelegte Zuschaltstrategie im Rahmen des Voraussimulationsverfahrens betrachtet werden. Folglich kann beispielsweise in einer vereinfachten Voraussimulation bei unveränderlichen Druckwerten, bzw. wenigstens einem unveränderlichen Druckwert, eine Reihe von Abschaltstrategien bzw. Zuschaltstrategien der von der Druckluftstation umfassten Kompressoren erfolgen, mittels derer eine vorzugsweise Abwendung eines zukünftigen Druckerignisses in der Druckluftstation ermittelt werden kann.

[0046] Zudem kann in einer weiterführenden Ausführungsform vorgesehen sein, dass sich die mindestens eine zuvor festgelegte Abschaltstrategie bzw. die min-

destens eine zuvor festgelegte Zuschaltstrategie aus einer jeweils in Listenform fest vorgegebenen Abschalt- bzw. Zuschaltreihenfolge ergibt. Die jeweiligen Reihenfolgen für das Abschalten bzw. Zuschalten etwa einzelner Kompressoren bzw. Kompressorengruppen kann sich dabei auch auf heuristische Erkenntnisse stützen oder aber auch auf Ergebnisse aus numerischen Rechnungen. Durch die Einschränkung des durch die Definition der vorgegebenen Abschalt- bzw. Zuschaltreihenfolgen eingeschränkten Variablenraums, kann die Rechenzeit für die Berechnung einzelner alternativer Schaltstrategien auf ein technisch vorteilhaftes Maß verkürzt werden.

[0047] Weiterhin kann in einer weiterführenden Ausführungsform vorgesehen sein, dass als Gruppe von alternativen Schaltstrategien auch die Zu- oder Abschaltung unterschiedlicher Kompressorengruppen bei festgelegten oder im Voraussimulationsverfahren noch zu bewertenden oberen Druckwerten oder unteren Druckwerten betrachtet werden. Das Zu- oder Abschalten unterschiedlicher Kompressorengruppen kann sich hierbei wieder auf heuristische Kenntnisse stützen oder aber auf vorbestimmte Reihenfolgen, welche mittels numerischer Berechnungen erstellt worden sind. Durch das Zu- oder Abschalten ganzer Kompressorengruppen kann gezielter und mitunter längerfristiger auf die Veränderung von Druckverhältnissen in der Druckluftstation eingewirkt werden.

[0048] In einer anderen Ausführungsform des Verfahrens zur Steuerung einer Druckluftstation kann vorgesehen sein, dass das Voraussimulationsverfahren basierend auf der Theorie für hybride Automaten ausgeführt wird. Damit steht der Realisation des Voraussimulationsverfahrens eine weite Grundlage zur Berechnung zur Verfügung, welche mit hoher Effizienz ausgeführt werden kann. Die Ausführung der Voraussimulationsverfahrens basierend auf hybriden Automaten ermöglicht im Gegensatz zur herkömmlichen Berechnung auf ausschließlicher Grundlage von digitalen Größen auch die Aufnahme von analogen Größen wie z. B. die von Echtzeitmessgrößen. Die kontinuierlichen Messgrößen nehmen dabei nicht einen Wert aus einer Reihe von möglichen Werten an, sondern können stufenlos verändert werden und erfordern deshalb eine gesonderte Behandlung. Hybride Automaten stellen eine Erweiterung des Konzepts der endlichen Automaten dar, mit welchen sich praktisch beliebige diskrete Systeme modellieren lassen.

[0049] Obwohl hybride Automaten nicht zwingend für die Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens verwendet werden müssen, sind sie ausführungsgemäß dennoch Voraussetzung für die Aufstellung des hier als vorteilhaft angesehenen Simulationsmodells.

[0050] In einer Weiterführung des Steuerungsverfahrens zur Steuerung einer Druckluftstation kann auch vorgesehen sein, dass das Voraussimulationsverfahren basierend auf Grundlage eines computerimplementierbaren und vorzugsweise deterministischen Modells ausgeführt wird. Dieses erlaubt vorbekannte computerimple-

mentierte Algorithmen und mathematische Methoden zu verwenden, wie sie in großem Umfang der numerischen Mathematik zur Verfügung stehen.

[0051] Weiterhin kann das Verfahren zur Steuerung einer Druckluftstation sich auch dadurch auszeichnen, dass das Gütekriterium durch einen möglichst geringen Energieverbrauch definiert oder zumindest maßgeblich mitbestimmt wird. Der Energieverbrauch, welcher beim Betrieb einer Druckluftstation mitunter den größten Kostenfaktor darstellt, kann folglich bereits im Vorfeld vor Eintreten konkreter Änderungen der Druckverhältnisse in der Druckluftstation bestimmt werden und durch ein Auswahlkriterium, etwa zur Verminderung bzw. Reduzierung des Energieverbrauchs, geeignet beeinflusst werden. Eine deutliche Rentabilitätserhöhung im Betrieb der Druckluftstation kann somit die Folge sein.

[0052] In einer weiterführenden Ausführungsform des Verfahrens zur Steuerung einer Druckluftstation kann auch vorgesehen sein, dass das Voraussimulationsverfahren wenigstens einen Datensatz mit prognostizierten, zukünftigen Zeitverläufen der Zustandsgrößen des Modells der Druckluftstation in verschiedenen Schaltstrategien zu unterschiedlichen, nicht unbedingt äquidistanten Zeitpunkten und/oder mit daraus abgeleiteten Kennziffern, vorzugsweise für den gesamten Steuerzyklus, liefert. Aufgrund der Erstellung eines solchen wenigstens einen Datensatzes ist es der Anlagensteuerung der Druckluftstation beispielsweise möglich, entsprechende Schaltstrategien zu veranlassen, ohne dass die Anlagensteuerung selbst das Voraussimulationsverfahren als einen unmittelbaren Steueralgorithmus, bzw. einen Teil eines unmittelbaren Steueralgorithmus, verwenden muss. Vielmehr kann das Voraussimulationsverfahren als eigenständiges numerisches Modul implementiert sein, welches bei Bedarf von der Anlagensteuerung initialisiert und ausgeführt wird.

[0053] In einer anderen Ausführungsform kann das Verfahren zur Steuerung einer Druckluftstation auch eine gegebenenfalls automatische Adaption des Modells der Druckluftstation an aktualisierte und/oder anfänglich nur näherungsweise bekannte und/oder nicht exakt eingestellte Anlagenparameter umfassen. Diese Aktualisierung gewährleistet, dass zu jedem Zeitpunkt, zu welchem das Voraussimulationsverfahren ausgeführt wird, geeignete Anlagenparameter während der gesamten Zeit des Betriebs der Druckluftstation zur Verfügung stehen. Eine automatische Adaption des Modells der Druckluftstation hinsichtlich aktualisierter Anlagenparameter kann neben der Gewährleistung einer genaueren Vorhersage mitunter auch eine erhöhte Geschwindigkeit zur Ausführung des Voraussimulationsverfahrens bewirken.

[0054] Fernerhin kann sich das erfindungsgemäße Verfahren in einer Ausführungsform auch dadurch auszeichnen, dass eine Adaption des Modells der Druckluftstation an aktualisierte Anlagenparameter dadurch erfolgt, dass aus mehreren alternativen Sätzen von Anlagenparametern derjenige ausgewählt wird, mit dem die nachträgliche Simulation des Betriebs der Druckluftsta-

tion für ein vergangenes Zeitintervall am besten mit dem real beobachteten Verlauf des Betriebs der Druckluftstation übereinstimmt. Diese Auswahlstrategie kann zudem noch dadurch unterstützt werden, dass sequenzielle gezielte Änderungen des Betriebszustandes jeweils einzelner Kompressoren und/oder Geräte der Druckluftstation durchgeführt werden, und dass im Rahmen der nachträglichen Simulation nur alternative Parameter des jeweiligen Kompressors und/oder des Gerätes untersucht und ausgewählt werden.

[0055] Ausführungsgemäß kann auch vorgesehen sein, dass im Voraussimulationsverfahren aktuelle veränderliche Systemzustandsgrößen der Druckluftstation berücksichtigt werden, insbesondere Informationen über den Betriebszustand wenigstens eines Druckfluidtanks, beispielsweise dessen Druck und/oder dessen Temperatur und/oder Informationen über die Betriebszustände einzelner Kompressoren, beispielsweise deren aktuelle Steuerungszustände und/oder aktuellen Funktionszuständen und/oder auch Informationen in Bezug auf die Veränderung der Menge an Druckfluid in der Druckluftstation, beispielsweise die Abnahme der Druckfluidmenge pro Zeiteinheit. Durch die Berücksichtigung aktueller veränderlicher Systemzustandsgrößen der Druckluftstation kann eine vollständigere und genauere Berechnung durchgeführt werden, welche in einer höheren Steuerungsgüte resultiert.

[0056] Das Verfahren zur Steuerung einer Druckluftstation kann sich auch dadurch auszeichnen, dass im Voraussimulationsverfahren als feste Systemparameter der Druckluftstation Informationen über die Liefermenge an Druckfluid einzelner Kompressoren und/oder über die Leistungsaufnahme einzelner Kompressoren in unterschiedlichen Lastzuständen und/oder Informationen über die Totzeiten der Kompressoren und/oder für die Kompressorenanlage charakteristische Mindestdruck- oder Maximaldruckgrenzen berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung der festen Systemparameter der Druckluftstation erlaubt weiterhin eine detailliertere Beschreibung der Druckluftstation selbst als auch für die Ausführung des Voraussimulationsverfahrens wichtige Randbedingungen, und resultiert folglich in einer verbesserten Vorhersage der Druckverhältnisse in der Druckluftstation mittels der Voraussimulation.

[0057] Das Verfahren zur Steuerung der Druckluftstation kann auch vorsehen, dass in der Voraussimulation über die simulierte Zeitspanne keine Änderung in der Konfiguration der sich in der Voraussimulation in Last befindenden Kompressoren und der sich in der Voraussimulation nicht in Last befindenden Kompressoren der Druckluftstation erfolgt. Durch eine derartige Verkleinerung des möglichen Variablenraumes kann die Voraussimulation schneller ausgeführt werden und erhöht folglich die Vorhersagegeschwindigkeit. Hierbei ist zu unterscheiden, dass die Konfiguration der sich in der Voraussimulation in Last bzw. nicht in Last befindenden Kompressoren der Druckluftstation nicht mit der aktuell vorherrschenden Konfiguration von Last- bzw. Nichtlast-

kompressoren der Kompressorenanlagen zum Zeitpunkt der Ausführung der Voraussimulation übereinstimmen muss. Vielmehr kann es entscheidend sein, in einer Voraussimulation eine Konfiguration an sich in Last befindenden Kompressoren bzw. sich nicht in Last befindenden Kompressoren anzunehmen, welche nicht mit der realen, aktuellen Situation übereinstimmt, um folglich die für die Steuerung der Druckluftstation relativ günstigste Schaltstrategie zu ermitteln.

[0058] Das Verfahren zur Steuerung einer Druckluftstation kann weiterhin vorsehen, dass ein Druckausgleichs-Kompressor aus der Anzahl der sich in der Voraussimulation in Last befindlichen Kompressoren der in Bezug auf die Kompressorleistung kleinste Kompressor ausgewählt wird, welcher, entsprechend der Voraussimulation, die längste Restlaufzeit in einem Leerlaufzustand aufweist, falls dieser Kompressor in einem sich in der Voraussimulation in Last befindlichen Kompressor in einen sich in der Voraussimulation nicht in Last befindlichen Kompressor überführt würde. Die Einteilung der Kompressoren in sich in der Voraussimulation in Last befindliche Kompressoren bzw. sich nicht in Last befindlichen Kompressoren geschieht auf der Basis von Prozessinformationen und der in der Steuerung hinterlegten Parametrierung. Zur Herbeiführung eines zukünftigen Druckausgleiches in der Druckluftstation kann ein Kompressor als Druckausgleichskompressor bestimmt werden, welcher zukünftig für einen entsprechenden realen Druckausgleich zu sorgen hat. Typischerweise wird dieser Druckausgleichskompressor aus der Menge der sich in der Voraussimulation in Last befindlichen Kompressoren ausgewählt. Für die Wahl des Druckausgleichskompressors können sowohl voreingestellte Parameter als auch Prozessinformationen (Zustandsgröße) der Druckluftstation herangezogen werden. Durch die Auswahl des in Bezug auf die Kompressorleistung kleinsten Kompressors als Druckausgleichskompressor aus der Anzahl an der sich in der Voraussimulation in Last befindlichen Kompressoren kann zudem die Leistungsaufnahme der Druckluftstation reduziert und die Kosten für den Betrieb der Druckluftstation erniedrigt werden.

[0059] Weiterhin kann das Verfahren zur Steuerung einer Druckluftstation vorsehen, dass für die Ermittlung des unteren Druckwertes wenigstens zwei Voraussimulationen mit gleicher Parametrisierung aber unterschiedlich gewählten numerischen Werten für den unteren Druckwert ausgeführt werden und die simulierten Zeitpunkte der Unterschreitung des unteren Druckwertes bestimmen. Hierbei findet die Ermittlung des unteren Druckwertes typischerweise nur statt, wenn der Druckausgleichskompressor aktuell nicht unter Last steht. Die Steuerung des Druckausgleichskompressors kann hierbei von einem Algorithmus übernommen werden, welcher mit den Druckwerten (unterer Druckwert und oberer Druckwert) arbeitet, die sich stets an die ändernden Verhältnisse in der Druckluftstation anpassen können. In einem stochastischen Verfahren können unterschiedliche Druckwerte vorgegeben werden und mittels des Voraus-

simulationsverfahrens gleichsam ausprobiert werden. Eine Ermittlung des unteren Druckwertes findet dabei typischerweise nur statt, wenn der Druckausgleichskompressor aktuell nicht unter Last steht. Anhand des Voraussimulationsverfahrens kann somit der voraussichtliche Zeitpunkt bestimmt werden, zu welchem die Unterschreitung eines zuvor parametrisierten Mindestdrucks der Druckluftstation erfolgt. Anhand heuristischer Regeln kann auch festgelegt werden, wann der Druckausgleichskompressor in dem Voraussimulationsverfahren als Lastkompressor behandelt wird. Ist beispielsweise der Kompressor 5 Sekunden vor Unterschreiten des Mindestdrucks in einem Leerlaufzustand, dann ist der untere Druckwert der Druck 5 Sekunden vor Unterschreiten des Mindestdrucks. Ist andererseits der Druckausgleichskompressor 5 Sekunden vor Unterschreiten des Mindestdrucks in einem ausgeschalteten Zustand, dann ist der untere Druckwert der Druck zum Zeitpunkt 15 Sekunden vor der Mindestdruckunterschreitung. Die Zeitspanne von 5 Sekunden kann dabei der ungefähren Totzeit eines Kompressors für den Zustandswechsel von einem Leerlaufzustand zu einem Lastzustand entsprechen. Die Zeitspanne von 15 Sekunden kann hingegen der ungefähren Totzeit eines Kompressors für den Zustandswechsel aus einem ausgeschalteten Zustand in einen Lastzustand entsprechen.

[0060] Das Verfahren zur Steuerung einer Druckluftstation kann sich auch dadurch auszeichnen, dass für die Ermittlung des oberen Druckwertes wenigstens zwei Voraussimulationen mit gleicher Parametrisierung aber unterschiedlich gewählten numerischen Werten für den oberen Druckwert ausgeführt werden und den Druckausgleichskompressor dann in einen sich in der Voraussimulation in Last befindlichen Kompressor überführen, wenn der Druck des Druckfluids in der Druckluftstation den unteren Druckwert unterschreitet, und dann in einen sich nicht in Last befindlichen Kompressor überführen, wenn der Druck des Druckfluids in der Druckluftstation den oberen Druckwert überschreitet. Vor jeder Voraussimulation wird dabei typischerweise der obere Druckwert neu festgelegt. Für den oberen Druckwert können ein minimaler sowie ein maximaler Wert vorgegeben werden. Der minimale Wert stimmt dabei typischerweise mit dem unteren Druckwert überein. Der Maximalwert des oberen Druckwertes kann sich ferner aus dem für den Betrieb der Druckluftstation zulässigen Maximaldruck ergeben. Überschreitet der Druck in der Druckluftstation beispielsweise den Maximaldruck, so muss der Druckausgleichskompressor automatisch abgeschaltet werden. Alle zwischen dem minimalen und dem maximalen Wert liegenden Werte für den oberen Druckwert sind in der Voraussimulation zulässige Druckwerte. Durch Aufteilen dieses Druckregimes in beispielsweise gleich beabstandete Druckgrenzen können eine vorbestimmte Anzahl an oberen Druckwerten mittels der Voraussimulation auf ihre für die Steuerung der Druckluftstation geeigneten Eigenschaften untersucht werden. Vorgesehen kann sein, dass derjenige Druckwert als

oberer Druckwert bestimmt wird, welcher über den simulierten zeitlichen Verlauf der Druckverhältnisse in der Druckluftstation den stabilsten Verlauf des Druckes erwarten lässt. In einer Weiterführung des Verfahrens zur Steuerung einer Druckluftstation kann vorgesehen sein, dass der in der Voraussimulation als relativ vorteilhaft ermittelte obere Druckwert aus der Gesamtheit aller in den Voraussimulationen eingestellten oberen Druckwerte stammt, und als relativ vorteilhaft in Bezug auf den Energieverbrauch hinsichtlich der simulierten Energieaufnahme aller Kompressoren ausgewählt wurde. Dementsprechend kann durch die geeignete Wahl eines oberen Druckwertes bereits ein erheblicher Beitrag zur Reduzierung der Betriebskosten der Druckluftstation geleistet werden.

[0061] Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die oberen wie unteren Druckwerte sind hierbei nicht als Grenzen eines realen oder gar festen Druckbandes zu verstehen sind, sondern als alternative obere bzw. untere Druckwerte, die als Auslöser für Schaltheilungen in Bezug auf Kompressoren zu unterschiedlichen und alternativen Schaltzeitpunkten "durchprobiert" werden können.

[0062] Außerdem kann vorgesehen sein, dass die in den Voraussimulationen eingestellten oberen Druckwerte zur Ermittlung eines vorteilhaften oberen Druckwertes in Schrittweiten von $\leq 0,5$ bar, speziell in Schrittweiten von $\leq 0,1$ bar, eingestellt werden, wobei die Schrittweiten der einander nachfolgend eingestellten bzw. untersuchten oberen Druckwerte nicht äquidistant beabstandet sein müssen, bzw. die Schrittweite zwischen den untersuchten oberen Druckwerten nicht konstant sein muss. Diese Schrittweiten erlauben, eine zuverlässige Ermittlung desjenigen oberen Druckwertes, welcher als relativ vorteilhaftester einzustufen ist. Hierbei beziehen sich die Schrittweiten auf Betriebsdrücke, bzw. Schwankungen von Betriebsdrücken, in Kompressorenanlagen, wie sie beispielsweise in einem industriellen Umfeld eingesetzt werden.

[0063] In einer Weiterführung des Steuerungsverfahrens zur Steuerung einer Druckluftstation kann vorgesehen sein, dass die Voraussimulation stochastische Modelle über die zeitliche Entwicklung des Verbraucherverhaltens hinsichtlich der Entnahme von Druckfluid aus der Druckluftstation verwendet. Dementsprechend können auch in der Voraussimulation die Entnahme von Druckfluid berücksichtigt werden, wie sie nährungsweise im regulären Betrieb der Druckluftstation erfolgen.

[0064] In einer alternativen Ausführungsform kann auch vorgesehen sein, dass die Voraussimulation künstlich intelligente und/oder lernfähige numerische Routinen in Bezug auf die zeitliche Entwicklung des Verbraucherverhaltens hinsichtlich der Entnahme von Druckfluid aus der Druckluftstation verwendet. Folglich wird eine relativ genaue Erfassung des Verbraucherverhaltens nach längerer Zeit der Benutzung der Druckluftstation gewährleistet. Eine Berücksichtigung des Verbraucherverhaltens hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung kann

somit in besonders günstiger Weise erfolgen.

[0065] In einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens, kann vorgesehen sein, dass die programmtechnische Realisierung des Verfahrens unter Verwendung von objektorientierten Programmiermethoden definiert ist, wobei zumindest die Kompressoren als Objekte angesehen werden. Demgemäß ist die Entwicklung und Implementierung des Modells der Druckluftstation besonders einfach ausgestaltet.

[0066] In einer bevorzugten Ausführungsform der Anlagensteuerung einer Druckluftstation wird für die Durchführung der Voraussimulation eine separate Hardware verwendet, die über ein Bussystem mit der Anlagensteuerung kommuniziert, die ihrerseits mit den Kompressoren und optional mit anderen Geräten der Drucklufttechnik in Kommunikationsverbindung steht.

[0067] In einer weiter bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens werden die Heuristiken zur Bildung alternativer Schaltstrategien durch ein im Simulationsmodell enthaltenes Modell einer Anlagensteuerung einer Druckluftstation realisiert, wobei das Modell der Anlagensteuerung in der Simulation die Steuerung und Regelung der simulierten Druckluftstation übernimmt und wobei alternativen Schaltstrategien durch Vorgabe alternativer Steuer- und Regelparameter für das Modell der Anlagensteuerung gebildet werden, von denen jeweils die relativ vorteilhafteste Schaltstrategie zur Veranlassung in der realen Druckluftstation ausgewählt wird.

[0068] Weitere Ausführungsformen der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen.

[0069] Nachfolgend wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen beschrieben, die anhand der Abbildung näher erläutert werden. Hierbei zeigen:

- Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Druckluftstation mit einer Anlagensteuerung, gemäß einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung,
- Fig. 2 eine schematische Darstellung einer Druckluftstation mit einer Anlagensteuerung, gemäß einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung,
- Fig. 3 ein Modell der Druckluftstation gemäß der Ausführungsform der realen Druckluftstation in Fig. 2,
- Fig. 4 eine Darstellung des zeitlichen Verlaufes des Drucks in einer Druckluftstation in Abhängigkeit der Änderung einer Stellgröße durch eine Stellhandlung,
- Fig. 5 ein Flussdiagramm zur Verdeutlichung des Verfahrens unter Verwendung einer Voraussimulation zur Steuerung einer Druckluftstation gemäß einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens,

- Fig. 6 ein Flussdiagramm zur Darstellung der Verwendung einer Voraussimulation in einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Steuerungs- bzw. Regelungsverfahrens,
- Fig. 7 eine Darstellung des zeitlichen Druckverlaufs einer Druckluftstation unter Verwendung von Druckbandgrenzen,
- Fig. 8 eine Darstellung des Druckverlaufs in einer Druckluftstation, welche ein Drucksteuerungsverfahren unter Verwendung dreier ineinander geschachtelter Druckbänder einsetzt,
- Fig. 9 zeitlicher Verlauf des Drucks in einer Druckluftstation gemäß einer Ausführungsform der Erfindung über eine zukünftige simulierte Zeitspanne bei virtuellen Stellgrößenänderungen,
- Fig. 10 einen Druckverlauf in einer Druckluftstation gemäß einer Ausführungsform der Erfindung über eine simulierte zukünftige Zeitspanne bei virtuellen Stellgrößenänderungen zur Ermittlung einer bevorzugten Schaltstrategie, und
- Fig. 11 eine zeitliche Druckänderung in einer Druckluftstation mittels eines Steuerverfahrens unter Berücksichtigung der Totzeit zweier Steuerungselemente.

[0070] In der nachfolgenden Beschreibung werden für gleiche oder gleichwirkende Teile die selben Bezugszeichen verwendet.

[0071] Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung einer ersten Ausführung einer Druckluftstation 1, welche mit einer Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Anlagensteuerung 3 zusammenwirkt und von dieser auch gesteuert bzw. geregelt wird. Weiter umfasst die Druckluftstation 1 drei Kompressoren 2, welche über Druckleitungen 9 sowie als Ventile ausgeführte Aktuatoren 5 mit zwei Drucklufttrockner 14 verschaltet sind. Das für einen oder mehrere Benutzer bereitgestellte Druckfluid 4 (vorliegend nicht gezeigt) wird in dem Druckfluidtank 8 bevorratet. Um die notwendigen Stellgrößenänderungen durch die Anlagensteuerung 3 vornehmen zu können, kann jeder Aktuator 5 über eine vorliegend nicht weiter bezeichnete Verbindung mit der Anlagensteuerung 3 angesprochen werden. Das Funktionsprinzip der Anlagensteuerung 3 entspricht hierbei grundsätzlich dem der weiteren, etwas komplexeren Ausführungsform gemäß Fig. 2.

[0072] Fig. 2 zeigt eine schematische Darstellung einer im Vergleich zur Ausführungsform nach Fig. 1 etwas komplexeren Druckluftstation 1, welche mit einer Anlagensteuerung 3 zusammenwirkt und von dieser gesteu-

ert bzw. geregelt wird. Die Druckluftstation 1 umfasst in der Anlagensteuerung 3 drei Kompressoren 2, welche bei entsprechender Steuerung bzw. Regelung zur Bereitstellung von Druckfluid 4 (vorliegend nicht gezeigt) an drei Druckfluidtanks 8 vorgesehen ist. Das Druckfluid 4 wird dabei aus jedem Kompressor 2 über eine Druckleitung 9 auf jeweils drei Aktuatoren 5, welche vorliegend als Ventile 5 ausgebildet sind, verteilt, welche mit den drei Druckfluidtanks 8 in Fluidverbindung stehen, und bei Bedarf jeden Druckfluidtank 8 mit Druckfluid versorgen können. Das Druckfluid 4 kann von einem Benutzer, bzw. mehreren Benutzern, aus der Druckluftstation 1 bei Bedarf entnommen werden. Die Entnahme erfolgt hierbei an einer vorliegend nicht weiter bezeichneten Abnehmerstation (Abnehmerstelle) derart, dass Druckfluid 4 aus allen Druckfluidtanks 8 entnommen werden kann. Entsprechend der an den Aktuatoren 5 vorgenommenen Schalthandlungen durch die Anlagensteuerung 3 kann zum einen gezielt Druckfluid 4 aus den Druckfluidtanks 8 an die Abnehmerstation zum Benutzer geleitet werden, andererseits ist auch ein Druckausgleich der einzelnen Druckfluidtanks 8 untereinander möglich. Um die notwendigen Stellgrößenänderungen bzw. Schaltstrategien durch die Anlagensteuerung 3 vornehmen zu können, kann jeder Aktuator 5 über eine vorliegend nicht weiter bezeichnete Verbindung mit der Anlagensteuerung 3 angesprochen werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde vorliegend nicht jeder Aktuator 5 ausdrücklich mit einer Verbindung zur Anlagensteuerung versehen. Jedoch sollte dem Fachmann offenbar sein, dass eine derartige Verbindung ausgeführt sein kann. Die von der Anlagensteuerung 3 an die Aktuatoren 5 übermittelten Stellsignale für Schalthandlungen können von vielfältigster Art sein und können überdem sowohl diskreter als auch kontinuierlicher Natur sein. Typischerweise gebräuchliche Stellsignale der Aktuatoren 5, insbesondere an Ventilen, können ein Aufschalten, Zuschalten oder auch ein nur graduelles Auf- bzw. Zuschalten umfassen. Über steuerbare Aktuatoren 5 können so Verbindungen zwischen der Abnehmerstation von einzelnen Fluidtanks 8 hergestellt sein. Weiterhin können mögliche Initialaktuatoren (z. B. Druckreduzierventile) zwischen den Druckfluidtanks 8 und der Abnehmerstation installiert werden. Ebenfalls denkbar ist der Anschluss mehrerer Abnehmerstationen an eine Druckluftstation 1. Weiterhin kann die Druckluftstation 1 Sensoren umfassen, welche zeitlich veränderliche Systemzustandsgrößen 56 (vorliegend nicht dargestellt) erfassen und der Anlagensteuerung 3 für die Steuerung bzw. Regelung der Druckluftstation 1 weiter zur Verfügung stellen. So können etwa die Druckfluidtanks 8 mit vorliegend nicht weiter bezeichneten Sensoren versehen sein, welche die Messung der Drücke in den einzelnen Druckfluidtanks 8 ermöglichen. Weiterführend kann die Druckluftstation 1 auch noch mit weiteren vorliegend nicht dargestellten Sensoren versehen sein, welche die Erfassung fluidtechnischer Größen zur Charakterisierung der Druckluftstation 1 erlauben.

[0073] Fig. 3 stellt ein Modell der Druckluftstation wie

in Fig. 2 gezeigt dar, welches beispielsweise in einer Anlagensteuerung 3 zur Steuerung der realen Druckluftstation Verwendung findet. Hierbei kann sich die Anlagensteuerung 3 eines Voraussimulationsverfahrens 20 (vorliegend nicht bezeichnet) entsprechend einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung bedienen oder auch nur eine symbolische Darstellung für die Parametrierung einer Druckluftstation 1 verkörpern. Findet das Modell der Druckluftstation 21 Verwendung in einem Steuerungs- bzw. Regelungsverfahren gemäß einer Ausführungsform der Erfindung, so ist jeder für den Betrieb der Druckluftstation wesentliche Bestandteil durch eine numerische Parametrierung (Parametrisierung) charakterisiert. Das Format dieser Parametrierung muss geeignet sein, um von der Anlagensteuerung 3 bzw. einem Voraussimulationsverfahren 20 (vorliegend nicht gezeigt) in geeigneter Weise verwendet zu werden. Die Parametrierung kann hierbei nicht nur durch numerische, sondern auch durch symbolische Werte erfolgen, so etwa durch die Vorgabe und Auswahl von Funktionsprinzipien, Bauformen, Baureihen- oder Typenbezeichnungen von Kompressoren.

[0074] Fig. 4 stellt den zeitlichen Verlauf des Drucks in der Druckluftstation 1, bzw. eines vorliegend nicht weiter bezeichneten Druckfluidtanks 8 unter Einwirkung einer Schaltstrategie 10 (Schalthandlung, Stellgrößenänderung) dar. Hierbei tritt die Schalthandlung zu dem Zeitpunkt der Gegenwart ein. Die Schaltstrategie 10 wird beispielsweise vorgenommen, um den in der Vergangenheit abfallenden Druck der Druckluftstation 1 entsprechend auszugleichen. Hierbei wird deutlich sichtbar, dass bei entsprechender Schalthandlung in der Gegenwart, beispielsweise einem Aufschalten eines Druckventils, im zeitlichen Verlauf der Zukunft eine Erhöhung des Drucks in der Druckluftstation 1 eintritt. Je nach Größe der Stellgrößenänderung erfolgt ein geringerer oder stärkerer Druckanstieg in der Zukunft. Im Falle einer großemäßig kleinen Stellgrößenänderung S_3 kommt es zu einem zukünftigen Druckverlauf, welcher mit T_3 bezeichnet ist. Entsprechend der Stellgrößenänderung S_2 kommt es zu einem zukünftigen Druckverlauf T_2 und bei einer Stellgrößenänderung S_1 tritt ein Druckverlauf gemäß der Kurve T_1 auf. Alle drei Stellgrößenänderungen S_1 , S_2 und S_3 sind geeignet, einen Druckabfall unter einen vorgegebenen Minimaldruck P_{\min} zu verhindern. Entsprechend eines Entscheidungskriteriums ist es nun Aufgabe der Anlagensteuerung 1 zu entscheiden, welche Stellgrößenänderung geeignet ist, um einen zukünftig gewünschten Druckverlauf herbeizuführen. Ein solches Entscheidungskriterium könnte vorliegend beispielsweise dafür verantwortlich sein, dass der Verlauf der durchgehend linierte Stellgrößenänderung S_3 von der Anlagensteuerung 1 als die bevorzugte Schaltstrategie 10 betrachtet wird.

[0075] Eine Auswahl einer bevorzugten Schaltstrategie 10 erfolgt gemäß des vorliegenden erfindungsgemäßen Verfahrens zur Steuerung einer Druckluftstation auch mittels einer Voraussimulation.

[0076] Fig. 5 stellt ein Flussdiagramm eines solchen Auswahlverfahrens mittels Voraussimulation dar. Hierbei wird ein Voraussimulationsverfahren (Voraussimulation) zum Zeitpunkt $t=0$ s (Gegenwart) mit den Zustandsvariablen initialisiert, welche den aktuellen Zustand der Druckluftstation 1 wiedergeben. Das Voraussimulationsverfahren wird unmittelbar nach der Initialisierung $t \approx 0$ s, also ein Zeitpunkt der im Rahmen der Simulationszeitspannen immer noch als Gegenwart bezeichnet werden kann) gestartet und liefert nach Ablauf des Verfahrens, bzw. nach mehrfachem Ablauf des Voraussimulationsverfahrens 20 mit veränderten Ausgangsparametern, vorliegend drei alternative Schaltstrategien 11 (Alt.1, Alt.2 und Alt.3) aus welchen mittels eines Gütekriteriums 22 die geeignete alternative Schaltstrategie 11 ausgewählt wird, um die Anlagensteuerung zu veranlassen, einen Schaltbefehl 30 zur Generierung einer Schaltstrategie 10 zu erzeugen. Die alternative Schaltstrategie 11 können ausführungsgemäß in zeitlich zukünftigen und vorhergesagten Verläufen des Drucks in der Druckluftstation 1 resultieren, wie etwa in den Druckverläufen T_1 , T_2 und T_3 des Druckverlaufes in Fig. 4.

[0077] Fig. 6 zeigt ein weiteres Flussdiagramm zur Darstellung eines Datensatzes 6, welcher Simulationsergebnisse der Voraussimulation 20 enthält. Wie zu Fig. 5 bereits erklärt, kann in einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Steuerungsverfahrens mittels eines Gütekriteriums 22 aus dem Datensatz 6 eine bevorzugte Schaltstrategie 10 bestimmt werden. Zur Initialisierung einer Voraussimulation, bzw. auch einer Folge von Voraussimulationen, bedarf es einer Eingabe von systemrelevanten Größen. Systemrelevante Größen können einerseits feste Systemparameter 55 sein, welche beispielsweise Informationen über die Liefermenge an Druckfluid einzelner Kompressoren enthalten, oder über die Leistungsaufnahme einzelner Kompressoren in unterschiedlichen Lastzuständen, Informationen über die Totzeiten der Kompressoren bzw. Aktuatoren, als auch für die Druckluftstation charakteristische Mindestdruck- und Maximaldruckgrenzen. Weiterhin können systemrelevante Parameter auch aus Systemzustandsgrößen 56 bestehen, welche zeitlich veränderliche Größen darstellen. Derartige Systemzustandsgrößen 56 der Druckluftstation 1 können die Informationen über den Betriebszustand wenigstens eines Druckfluidtanks 8 enthalten oder dessen Druck, dessen Temperatur, sie können Informationen über die Betriebszustände einzelner Kompressoren 2 umfassen, sowie deren aktuelle Steuerungszustände bzw. Funktionszustände, als auch Informationen in Bezug auf die Veränderung der Menge an Druckfluid 4 in der Druckluftstation 1, wie beispielsweise die Veränderung von Druckfluid pro Zeiteinheit, deren Fluss bzw. deren andere physikalische Parameter. Die Qualität der Voraussimulation 20 basiert auf der Qualität bzw. Anzahl an festen Systemparametern 55 und Systemzustandsgrößen 56, welche der Voraussimulation 20 zugrundegelegt werden.

[0078] Fig. 7 zeigt die Darstellung eines Druckverlaufes

einer Druckluftstation in Bezug auf ein Druckband, welches eine Druckbanduntergrenze 42 mit einem Minimaldruck P_{\min} definiert sowie eine Druckbandobergrenze 41 mit einem Maximaldruck P_{\max} . Bei Verwendung eines einzigen fest vorgegebenen Druckbandes zur Steuerung einer Druckluftstation 1, wie es etwa bei einer aus dem Stand der Technik bekannten Reihenfolgesteuerung zutrifft, wird bei Verlassen des Druckbandes durch den Druckverlauf eine entsprechende Schalthandlung. So kann beispielsweise beim Verlassen des Druckverlaufes nach unten über die Druckbanduntergrenze 42 eine Zuschalthandlung veranlasst werden, welche einen zusätzlichen Kompressor zur Lieferung von Druckfluid bereitstellt. Eine derartige Schalthandlung wird zu dem Zeitpunkt veranlasst, zu welchem der Druckverlauf die Druckbanduntergrenze 42 verlässt, wodurch die Lieferung von zusätzlichem Druckfluid derart erfolgt, dass nach einer geringen Zeitspanne des Unterschreitens der Druckverlauf wieder innerhalb der Grenzen des fest vorbestimmten Druckbandes folgt. Verlässt andererseits der Druckverlauf die Druckbandobergrenze 41 nach oben, kann beispielsweise durch eine Abschalthandlung zum Zeitpunkt des Verlassens der Druckbandobergrenze 41 der Druckverlauf derart korrigiert werden, dass nach einer geringen Zeitspanne des Überschreitens dieser wieder innerhalb der Druckbandgrenzen erfolgt.

[0079] Um den Druckverlauf in der Druckluftstation 1 bereits dann steuerungstechnisch beeinflussen zu können, bevor der Minimaldruck P_{\min} unterschritten bzw. der Maximaldruck P_{\max} überschritten wird, können in die Berechnungen zur Veranlassung der Schalthandlungen auch noch weitere ineinander verschachtelte Druckbänder definiert werden. So zeigt Fig. 8 etwa den Druckverlauf einer Druckluftstation 1 relativ zu drei ineinander geschichteten Druckbändern. Das kleinste Druckband mit der Druckuntergrenze 42 von P_{U1} und der Druckobergrenze 41 mit dem Druck P_{O1} liegt innerhalb des nächst größeren Druckbandes mit der Druckuntergrenze 42 von P_{U2} und der Druckbandobergrenze 41 mit dem Druck P_{O2} . Beide vorher bezeichneten Druckbänder liegen wieder innerhalb des größten Druckbandes, welches eine Druckuntergrenze 42 von P_{\min} aufweist sowie einen Maximaldruck der Druckbandobergrenze 41 von P_{\max} . Um nun ein Verlassen des Druckverlaufes jenseits der Druckbandgrenzen des größten Druckbandes zu verhindern, können von der Anlagensteuerung 3 (vorliegend nicht aufgeführt) Schalthandlungen bereits zu den Zeitpunkten veranlasst werden, zu welchen der Druckverlauf die Druckbandgrenzen des kleinsten bzw. nächst größeren Druckbandes überschreiten. Aufgrund der in der Druckluftstation immanenten Verzögerungszeiten nach Vornehmen einer Schalthandlung kommt es nach entsprechend kurzen Zeitspannen zu einer Korrektur des Druckverlaufes.

[0080] Die in den Fig. 7 und 8 dargestellten Druckverläufe resultieren aus Schalthandlungen, welche durch rein reaktive Steuerungsverfahren veranlasst worden sind. Lediglich wenn zu einem Zeitpunkt ein vorbestimm-

tes Druckereignis eingetreten ist (beispielsweise Verlassen der Druckbandgrenzen) wird eine entsprechende Schalthandlung veranlasst. Im Gegensatz hierzu werden gemäß der vorliegenden Erfindung Schaltstrategien zukünftig simuliert, um einen gewünschten Druckverlauf einzustellen.

[0081] Fig. 9 zeigt eine derartige Simulation über eine zukünftige simulierte Zeitspanne 23. Hierbei wird zu einem in der Gegenwart liegenden Zeitpunkt eine Schaltstrategie 10 vorgenommen, welche die Stellgröße von einem Wert a) auf einen kleineren Wert b) verringert. Der zu erwartende zukünftige Verlauf des Drucks in der Druckluftstation folgt einem zeitlich leicht verzögerten Abfall. Um einem Druckabfall unterhalb eines vorbestimmten Wertes zu vermeiden bzw. um einen stabilen Druckverlauf einzustellen, wird zu einem zukünftigen Zeitpunkt in der Voraussimulation virtuell eine Änderung der Stellgröße von dem Wert b) auf den höheren Wert c) vorgenommen. Diese virtuelle Stellgrößenänderung hat einen virtuellen Anstieg des Drucks in der Druckluftstation 1 zur Folge. Hierbei kann beispielsweise die virtuelle Stellgrößenänderung in einer Zuschaltstrategie 13 eines Kompressors liegen. Um jedoch einen übermäßig großen virtuellen Druckanstieg zu vermeiden, wird zu einem späteren simulierten Zeitpunkt eine weitere Stellgrößenänderung von dem Wert c) auf den Wert d) vorgenommen. Diese zweite virtuelle Stellgrößenänderung auf den Wert d) kann beispielsweise in einer Abschaltstrategie 12 liegen. Aufgrund der Kombination beider virtueller Stellgrößenänderungen ist es möglich, gegen Ende der simulierten Zeitspanne 23 einen stabilen virtuellen Druckverlauf einzustellen. Werden nun beispielsweise die beiden virtuellen Stellgrößenänderungen zu den entsprechenden Zeitpunkten in der realen Zukunft als tatsächliche Schaltstrategie 10 vorgenommen, ist ein Einstellen eines stabilen Druckverlaufs zu erwarten. Durch Ausführen der Voraussimulation kann somit gleichsam das zukünftige Verhalten der Druckluftstation vorhergesagt werden, und die Informationsbasis zum Zustand der Druckluftstation noch auf zukünftige Zeitpunkte erweitert werden.

[0082] Fig. 10 stellt im Vergleich zu dem Druckverlauf, welcher in Fig. 9 aufgezeigt ist, drei mögliche virtuelle Druckverläufe dar, wie sie sich als Folge von unterschiedlichen Stellgrößenänderungen gemäß der Voraussimulation 20 über die simulierte Zeitspanne 23 ergeben würden. Je nach den virtuellen Zuschaltstrategien 13 bzw. Abschaltstrategien 12 ergibt sich ein am Ende der simulierten Zeitspanne 23 stabiler bzw. ansteigender oder abfallender Druckverlauf. Hierbei ist auch anzuführen, dass sich die in den unterschiedlichen Simulationen vorgenommenen virtuellen Schaltstrategien 10 auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen können. Weiterhin können die unterschiedlichen Stellgrößenänderungen auch noch durch das Entnahmeverhalten von Druckfluid durch einen oder mehrere Benutzer aus der Druckluftstation 1 beeinflusst sein. Entsprechend resultiert die Folge von Schalthandlungen, welche mit S_1 bezeichnet

ist, in einem gegen Ende der simulierten Zeitspanne 23 ansteigenden Druckverlauf T_1 . Die Folge von Schalthandlungen, welche mit S_2 bezeichnet ist, resultiert in einem gegen Ende der simulierten Zeitspanne 23 weitgehend stabilen Verlauf des Drucks in der Druckluftstation 1. Die Folge von Schalthandlungen, welche mit S_3 bezeichnet ist, resultiert am Ende der simulierten Zeitspanne 23 in einem abfallenden Druckverlauf T_3 . Würde aus den drei möglichen, simulierten Druckverläufen mittels eines Gütekriteriums 22 (vorliegend nicht aufgeführt) derjenige Druckverlauf ausgewählt werden, welcher am Ende der simulierten Zeitspanne 23 die relativ geringsten Schwankungen aufweist, so legt die durchgeführte Voraussimulation 20 nahe, Schalthandlungen 10 gemäß der mit S_2 bezeichneten Reihenfolge an Schalthandlungen zu den entsprechenden zukünftigen Zeitpunkten auszuführen. Wie dem Fachmann verständlich sein wird, können auch durch Variation zahlreicher weiterer Parameter in der Voraussimulation zahlreiche mögliche virtuelle Druckverläufe generiert werden, aus welchen gemäß eines Gütekriteriums 22 der dann beste ausgewählt werden kann.

[0083] Durch die Einführung eines Voraussimulationsverfahrens 20 ist es möglich, die effektiven Totzeiten der in der Druckluftstation 1 verwendeten Elemente in der Simulation zu berechnen und diese damit bei der Berechnung der Zeitpunkte, zu welchen Schaltstrategien 10 vorgenommen werden, implizit mit einzubeziehen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die verwendeten Modelle der Druckluftstation 21 das Totzeitverhalten enthalten. Folglich ist es nicht mehr nötig, die Totzeiten einzelner Aktuatoren 5 in der Anlagensteuerung 3 explizit zu berücksichtigen. Aktuatoren 5 können hierbei auch von Kompressoren 2 und weiteren optionalen Geräten der Druckluftstation umfasst werden, welche etwa durch geeignete Stellsignale zum Zwecke der Stellgrößenänderung angesteuert werden können. Aktuatoren 5 sind folglich nicht nur auf externe Ventile 5, wie in Fig. 2 dargestellt, beschränkt. Das Überwinden der Totzeiten erfolgt automatisch mit Hilfe der erzeugten Voraussimulation. Diese ermöglicht einerseits herauszufinden, ob die in der Vergangenheit durchgeführten Stellgrößenänderungen ausreichend waren, um unerwünschte Ereignisse abzuwenden, andererseits kann überprüft werden, ob durch in der Gegenwart eingeleitete Stellgrößenänderungen das zeitliche Verhalten des Druckverlaufs überhaupt zusätzlich positiv beeinflusst werden kann.

[0084] In Fig. 11 ist der Druckverlauf einer Druckluftstation 1 über einen zeitlichen Verlauf dargestellt. In der Vergangenheit wurde vorliegend eine Schalthandlung zum Zeitpunkt T_1 am ersten Aktuator vorgenommen. Bedingt durch die Totzeit des ersten Aktuatoren 5 ist die Auswirkung dieser Schalthandlung im Druckverlauf in der Gegenwart noch nicht zu erkennen. In der Gegenwart besteht folglich die Möglichkeit, eine weitere Schalthandlung an einem zweiten Aktuator durchzuführen. Erst jedoch, wenn der zukünftige Druckverlauf simuliert werden kann, kann entschieden werden, ob die Schalthandlung

am zweiten Aktuator den Erfüllungsgrad einer Randbedingung (beispielsweise Vermeiden der Unterschreitung des Minimaldrucks P_{\min}) verbessert werden kann, oder überhaupt notwendig war. Wird die Voraussimulation für beide möglichen Schaltstrategien über die simulierte Zeitspanne 23 ausgeführt, wird ersichtlich, dass die Schalthandlung am zweiten Aktuator 5 nicht notwendig ist, um die Einhaltung der Randbedingungen zu gewährleisten. Zudem lässt sich erkennen, dass die Totzeit des zweiten Aktuators 5 erst überwunden wird, nachdem der Druck in der Druckluftstation 1 bereits deutlich oberhalb des Mindestdrucks P_{\min} liegt. Folglich könnte auf Grundlage des durchgeführten Voraussimulationsverfahrens 20 entschieden werden, dass die Vornahme der Schalthandlung am zweiten Aktuator zur Verbesserung des Druckverlaufs in der Druckluftstation 1 unterbleiben soll.

[0085] An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass alle oben beschriebenen Teile für sich alleine gesehen und in jeder Kombination, insbesondere die in den Zeichnungen dargestellten Details als erfindungswesentlich beansprucht werden. Abänderungen hiervon sind dem Fachmann geläufig.

Bezugszeichen:

[0086]

- 1 Druckluftstation
- 2 Kompressor
- 3 Anlagensteuerung
- 4 Druckfluid
- 5 Aktuator
- 6 Datensatz
- 8 Druckfluidtank
- 9 Druckleitung

- 10 Schaltstrategie
- 11 alternative Schaltstrategie
- 12 Abschaltstrategie
- 13 Zuschaltstrategie
- 14 Drucklufttrockner

- 20 Voraussimulationsverfahren
- 21 Modell der Kompressoranalge
- 22 Gütekriterium
- 23 Zeitspanne

- 30 Schaltbefehl
- 41 Druckbandobergrenze
- 42 Druckbanduntergrenze

- 54 Druckausgleichs-Kompressor
- 55 Systemparameter
- 56 Systemzustandsgröße

- 60 Hardware
- 61 Bussystem

- 70 Simulationskern
- 71 Algorithmenkern
- 72 Informationsbasis

5

Patentansprüche

10

1. Verfahren zur Steuerung bzw. Regelung einer Druckluftstation (1), die wenigstens eine Mehrzahl von untereinander vernetzten Kompressoren (2), umfasst, welches sowohl Schaltstrategien (10) über eine elektronische Anlagensteuerung (3) zur Beeinflussung einer Menge eines für einen oder mehrere Benutzer der Druckluftstation (1) jederzeit zur Verfügung stehenden Druckfluids (4) in der Druckluftstation (1) veranlassen kann, als auch die für einen oder mehrere Benutzer der Druckluftstation (1) jederzeit zur Verfügung stehende Menge an Druckfluid (4) auf zukünftige Betriebsbedingungen der Druckluftstation (1) adaptiv auf die Entnahmemenge an Druckfluid (4) aus der Druckluftstation (1) einzustellen vermag,

wobei vor Veranlassung einer Schaltstrategie (10) verschiedene Schaltstrategien (10) in einem Voraussimulationsverfahren (20) unter Zugrundelegung eines Modells (21) der Druckluftstation (1) überprüft werden und aus den überprüften Schaltstrategien (10) anhand mindestens eines festgelegten Gütekriteriums (22) die relativ vorteilhafteste Schaltstrategie (10) ausgewählt wird und die ausgewählte Schaltstrategie (10) an die Anlagensteuerung (3) zur Veranlassung in der Druckluftstation (1) weitergeleitet wird.

35

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** vorbestimmte Druckobergrenzen und/oder Druckuntergrenzen als einzuhaltende Randbedingungen im Verfahren (20) berücksichtigt werden.

40

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Modell (21) der Druckluftstation (1) auf einem Satz zeitabhängiger und/oder nichtlinearer sowie fallweise zur Nachbildung von Unstetigkeiten und/oder Totzeiten im Verhalten der Kompressoren und/oder strukturvarianter Differentialgleichungen basiert, die auch die Erfassung der Auswirkung zurückliegender Ereignisse auf die aktuellen Zustandsgrößen der Druckluftstation (1) erlauben.

45

50

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** innerhalb des Voraussimulationsverfahrens (20) eine Entwicklung der verschiedenen Schaltstrategien (10) über eine vorbestimmte Zeitspanne (23) in diskreten oder kontinuierlichen Schritten prognostiziert bzw. berechnet wird.

55

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Zeitspanne der Voraussimulation (20) durch ein Abbruchkriterium auf Basis von Parametern und/oder Zustandsgrößen des Modells der Druckluftstation (1) und/oder von Aufzeichnungen oder Prognosen des Druckluftverbrauchs adaptiv angepasst wird.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Gruppe von alternativen Schaltstrategien (10) unterschiedliche obere Druckwerte (41) oder untere Druckwerte (42) als Kriterium für die Veranlassung einer zuvor festgelegten Schaltstrategie (10) im Rahmen des Voraussimulationsverfahrens (20) betrachtet werden.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Gruppe von alternativen Schaltstrategien (10) für wenigstens einen der untereinander vernetzten Kompressoren unterschiedliche obere Druckwerte (41) oder untere Druckwerte (42) für mindestens eine zuvor festgelegte Abschaltstrategie (12) bzw. mindestens eine zuvor festgelegte Zuschaltstrategie (13) im Rahmen des Voraussimulationsverfahrens (20) betrachtet werden.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Gruppe von alternativen Schaltstrategien (10) auch die Zu- oder Abschaltung unterschiedlicher Kompressorgruppen (5a, 5b) bei festgelegten oder im Voraussimulationsverfahren (20) noch zu bewertenden oberen Druckwerten (41) oder unteren Druckwerten (42) betrachtet werden.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Gütekriterium (22) durch einen möglichst geringen Energieverbrauch definiert oder zumindest maßgeblich mitbestimmt wird.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Voraussimulationsverfahren (20) wenigstens einen Datensatz (6) mit prognostizierten, zukünftigen Zeitverläufen der Zustandsgrößen des Modells der Druckluftstation (1) in verschiedenen Schaltstrategien (10) zu unterschiedlichen, nicht unbedingt äquidistanten Zeitpunkten und/oder mit daraus abgeleiteten Kennziffern, vorzugsweise für den gesamten Steuerzyklus, liefert.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Verfahren eine ggf. automatische Adaption des Modells der Druckluftstation (1) an aktualisierte und/oder anfänglich nur nährungsweise bekannte und/oder nicht exakt eingestellte Anlagenparameter umfasst.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Voraussimulationsverfahren (20) aktuelle veränderliche Systemzustandsgrößen (56) der Druckluftstation (1) berücksichtigt werden, und/oder Informationen über die Betriebszustände einzelner Kompressoren (2) und/oder auch Informationen in Bezug auf die Veränderung der Menge an Druckfluid (4) in der Druckluftstation (1), beispielsweise die Abnahme der Druckfluidmenge pro Zeiteinheit und/oder dass im Voraussimulationsverfahren (20) als feste Systemparameter (55) der Druckluftstation (1) Informationen über die Liefermenge an Druckfluid (4) einzelner Kompressoren (2), und/oder über die Leistungsaufnahme einzelner Kompressoren (2) in unterschiedlichen Lastzuständen, und/oder Informationen über die Totzeiten der Kompressoren (2), und/oder für die Druckluftstation (1) charakteristische Mindestdruck- und Maximaldruckgrenzen berücksichtigt werden.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Voraussimulation (20) künstlich intelligente, und/oder lernfähige numerische Routinen in Bezug auf die zeitliche Entwicklung des Verbraucherverhaltens hinsichtlich der Entnahme von Druckfluid (4) aus der Druckluftstation (1) verwendet.
14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Verfahren, welches in einer elektronischen Steuerung einer Druckluftstation (1) implementiert ist, Informationen über wesentliche Zustandsgrößen der Druckluftstation (1) als Eingabeinformation verarbeitet, und Steuerbefehle zur Steuerung von zumindest einigen Kompressoren (2) als Ausgabe abgibt, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Verfahren folgende Funktionsstrukturen aufweist:
- einen Simulationskern (70), in dem zur Beschreibung des Verhaltens zumindest einiger Komponenten der Druckluftstation (1) dynamische Modelle dieser Komponenten enthalten sind, wobei der Simulationskern (70) so konfiguriert ist, dass er als Simulationsergebnis den Zeitverlauf aller im Modell enthaltenen Zustandsgrößen der Komponenten der Druckluftstation (1) auf Basis angenommener alternativer Schaltstrategien (10) vorausberechnet, wobei die Modelle des Simulationskerns (70) die wesentlichen Nichtlinearitäten und/oder Unstetigkeiten und/oder Totzeiten im Verhalten der Komponenten berücksichtigen;
 - einen Algorithmenkern (71), der Parameter zur Charakterisierung der Komponenten der Druck-

luftstation (1), Topologieinformationen über die Verschaltung der einzelnen Komponenten, Heuristiken zur Bildung alternativer Schaltstrategien (10) und Bewertungskriterien für die vom Simulationskern (70) ermittelten Zeitverläufe der Zustandsgrößen der Komponenten der Druckluftstation (1) für die alternativen Schaltstrategien (10) enthält, und der auf dieser Basis die relativ vorteilhafteste Schaltstrategie (10) auswählt und entsprechende Steuerbefehle an zumindest einige Kompressoren (2) bereithält bzw. übergibt; und

- eine Informationsbasis (72), die neben einem aus Sensorwerten und ggf. vom Algorithmenkern (71) bereitgestellten Aktuatorwerten gebildeten Prozessabbild auch die Simulationsergebnisse für alternative Schaltstrategien (10) enthält, wobei die Informationsbasis (72) zumindest einen Teil der gemeinsamen Datenbasis von Algorithmen- (71) und Simulationskern (70) darstellt und dem Datenaustausch zwischen Algorithmen- (71) und Simulationskern (70) dient.

15. Anlagensteuerung (3) einer Druckluftstation (1), die eine Mehrzahl von untereinander vernetzten Kompressoren (2) umfasst, welche sowohl Schaltstrategien (10) von Stellelementen (7) der Druckluftstation (1) und/oder unterschiedlicher Kompressoren (2) zur Beeinflussung der Menge des für einen oder mehrere Benutzer der Druckluftstation (1) jederzeit zur Verfügung stehenden Druckfluids (4) in der Druckluftstation (1) veranlassen kann, als auch die für einen oder mehrere Benutzer der Druckluftstation (1) jederzeit zur Verfügung stehende Menge an Druckfluid (4) auf zukünftige Betriebsbedingungen adaptiv auf die Entnahmemenge an Druckfluid (4) aus der Druckluftstation (1) einzustellen vermag, wobei vor Vornahme einer Schaltstrategie (10) verschiedene Schaltstrategien (10) in einem Voraussimulationsverfahren (20) unter Zugrundelegung eines Modells (21) der Druckluftstation (1) überprüft werden und aus den Schaltstrategien (10) anhand mindestens eines festgelegten Gütekriteriums (22) die relativ vorteilhafteste Schaltstrategie (10) ausgewählt wird und die Anlagensteuerung (3) aufgrund der ausgewählten Schaltstrategie (10) einen Schaltbefehl (30) erzeugt.

Claims

1. Method for controlling and regulating a compressed air station (1) comprising at least a plurality of interlinked compressors (2), which method is capable of initiating both switching strategies (10) via an electronic plant control (3) for influencing an amount of a compressed fluid (4) that is available at any time in the compressed air station (1) to one or more users

of the compressed air station (1) and is able to adjust the amount of compressed fluid (4) that is available at any time to one or more users of the compressed air station (1) to future operating conditions of the compressed air station (1) in an adaptive manner to the withdrawal quantity of compressed fluid (4) from the compressed air station, wherein, prior to initiating a switching strategy (10), different switching strategies (10) are checked in a preliminary simulation method (20) on the basis of a model (21) of the compressed air station (1), and the relatively most beneficial switching strategy (10) is selected from the checked switching strategies (10) using at least one fixed quality criterion (22), and the selected switching strategy (10) is forwarded to the plant control (3) for being initiated in the compressed air station (1).

2. Method according to claim 1, **characterized in that** predetermined upper pressure limits and/or lower pressure limits are taken into account as boundary conditions to be met in the method (20).
3. Method according to any one of the preceding claims, **characterized in that** the model (21) of the compressed air station (1) is based on a set of differential equations that are time-dependent and/or non-linear as well as from case to case for modelling discontinuities and/or dead times in the compressors' behavior and/or structurally variable, which equations also allow the effect of past events on the current state variables of the compressed air station (1) to be taken into account.
4. Method according to any one of the preceding claims, **characterized in that**, within the preliminary simulation method (20), a development of the different switching strategies (10) over a predetermined period of time (23) in discrete or continuous steps is predicted or calculated.
5. Method according to any one of the preceding claims, **characterized in that** the period of time of the preliminary simulation (20) is adjusted in an adaptive manner by an abort criterion on the basis of parameters and/or state variables of the model of the compressed air station (1) and/or records or predictions of the compressed air consumption.
6. Method according to any one of the preceding claims, **characterized in that**, as a group of alternative switching strategies (10), differing upper pressure values (41) or lower pressure values (42) are considered within the framework of the preliminary simulation method (20) as a criterion for initiating a previously specified switching strategy (10).
7. Method according to any one of the preceding

- claims, **characterized in that**, as a group of alternative switching strategies (10) for at least one of the interlinked compressors, differing upper pressure values (41) or lower pressure values (42) are considered within the framework of the preliminary simulation method (20) for at least one previously specified switch-off strategy (12) and at least one previously specified switch-on strategy (13), respectively.
8. Method according to any one of the preceding claims, **characterized in that**, as a group of alternative switching strategies (10), even the switching-on or switching-off of various compressor groups (5a, 5b) is considered at upper pressure values (41) or lower pressure values (42) that are fixed or still to be evaluated in the preliminary simulation method (20).
9. Method according to any one of the preceding claims, **characterized in that** the quality criterion (22) is defined or at least co-determined in a decisive manner by a lowest possible energy consumption.
10. Method according to any one of the preceding claims, **characterized in that** the preliminary simulation method (20) renders at least one data set (6) including predicted future temporal progresses of the state variables of the compressed air station (1) model under various switching strategies (10) at different, not necessarily equidistant points of time and/or including characteristic numbers derived therefrom, preferably for the entire control cycle.
11. Method according to any one of the preceding claims, **characterized in that** the method comprises an optionally automated adaption of the compressed air station (1) model to plant parameters that are upgraded and/or initially only approximately known and/or not precisely set.
12. Method according to any one of the preceding claims, **characterized in that** in the preliminary simulation method (20), current variable system state variables (56) of the compressed air station (1) are taken into account, and/or information on the operating states of individual compressor (2) and/or else information referring to the change in the amount of compressed fluid (4) in the compressed air station (1), for example the decrease of the compressed fluid amount per time unit and/or that in the preliminary simulation method (20), as fixed system parameters (55) of the compressed air station (1), information on the delivery quantity of compressed fluid (4) of individual compressors (2) and/or on the energy input of individual compressors (2) under differing load conditions and/or information on dead times of the compressors (2) and/or minimum pressure and maximum pressure limits that are characteristic for the compressed air station (1) are taken into account.
13. Method according to any one of claims 1 to 12, **characterized in that** the preliminary simulation (20) uses artificially intelligent and/or adaptive numerical routines referring to the temporal development of consumer behavior with respect to the withdrawal of compressed fluid (4) from the compressed air station (1).
14. Method according to any one of the preceding claims, wherein the method which is implemented in an electronic control of a compressed air station (1) processes information on essential state variables of the compressed air station (1) as input information and outputs control instructions for controlling at least some compressors (2) as an output, **characterized in that** the method exhibits the following function structures:
- a simulation core (70) in which, for describing the behavior of at least some components of the compressed air station (1), dynamic models of these components are included, wherein the simulation core (70) is configured to calculate in advance as a simulation result the temporal progress of all of the model-related state variables of the components of the compressed air station (1) on the basis of assumed alternative switching strategies (10), the model of the simulation core (70) taking into account the essential non-linearities and/or discontinuities and/or dead times in the behavior of the components;
 - an algorithm core (71) which contains parameters for characterizing the components of the compressed air station (1), topology information on the interconnection of individual components, heuristics for creating alternative switching strategies (10) and evaluation criteria for the temporal evolutions of the state variables of the compressed air station's (1) components for the alternative switching strategies (10) obtained by the simulation core (70), and selects, on this basis, the relatively most beneficial switching strategy and keeps and hands over corresponding control commands to at least some compressors (2);
 - an information base (72) which includes, in addition to a process map formed from sensor values and actuator values optionally provided by the algorithm core (71), also the simulation results for alternative switching strategies (10), wherein the information base (72) represents at least part of a common data base of the algorithm core (71) and simulation core (70) and serves to exchange data between the algorithm core (71) and simulation core (70).

15. Plant control (3) of a compressed air station (1) comprising a plurality of interlinked compressors (2), which plant control is capable of initiating both switching strategies (10) of actuators (7) of the compressed air station (1) and/or of various compressors (2) for influencing the amount of the compressed fluid (4) that is available at any time in the compressed air station (1) to one or more users of the compressed air station (1) and is able to adjust the amount of compressed fluid (4) that is available at any time to one or more users of the compressed air station (1) to future operating conditions in an adaptive manner to the withdrawal quantity of compressed fluid (4) from the compressed air station, wherein, prior to performing a switching strategy (10), different switching strategies (10) are checked in a preliminary simulation method (20) on the basis of a model (21) of the compressed air station (1), and the relatively most beneficial switching strategy (10) is selected from the switching strategies (10) using at least one fixed quality criterion (22), and the plant control (3) generates a switching command (30) based on the selected switching strategy (10).

Revendications

1. Procédé pour la commande ou régulation d'une station d'air comprimé (1) qui comprend au moins une pluralité de compresseurs (2) mis en réseau entre eux, lequel peut lancer des stratégies de commutation (10) via une commande d'installation (3) électronique destinée à influencer une quantité d'un fluide sous pression (4) disponible à tout moment pour un ou plusieurs utilisateurs de la station d'air comprimé (1) tout autant qu'il est capable de régler de manière adaptative la quantité de fluide sous pression (4) disponible à tout moment pour un ou plusieurs utilisateurs de la station d'air comprimé (1) à la quantité de soutirage de fluide sous pression (4) à partir de la station d'air comprimé (1) en fonction de conditions de fonctionnement futures de la station d'air comprimé (1), sachant qu'avant le lancement d'une stratégie de commutation (10), diverses stratégies de commutation (10) sont examinées dans un procédé de simulation préalable (20) sur la base d'un modèle (21) de la station d'air comprimé (1) et, en fonction d'au moins un critère de qualité (22) défini, la stratégie de commutation (10) la plus avantageuse relativement est sélectionnée à partir des stratégies de commutation (10) examinées et la stratégie de commutation (10) sélectionnée est transmise à la commande d'installation (3) pour être lancée dans la station d'air comprimé (1).

2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** des limites supérieures et/ou inférieures de

pression prédéterminées sont prises en compte dans le procédé (20) comme conditions marginales à respecter.

3. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le modèle (21) de la station d'air comprimé (1) est basé sur un jeu d'équations différentielles dépendantes du temps et/ou non linéaires ainsi que selon le cas destinées à représenter des instabilités et/ou des temps morts dans le comportement des compresseurs et/ou variables en termes de structure, qui permettent aussi la saisie de la répercussion de résultats antérieurs sur les grandeurs d'état actuelles de la station d'air comprimé (1).

4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que**, au sein du procédé de simulation préalable (20), un développement des diverses stratégies de commutation (10) est pronostiqué ou calculé par paliers discrets ou continus sur un laps de temps (23) prédéterminé.

5. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le laps de temps de la simulation préalable (20) est adapté de manière adaptative par un critère d'arrêt sur la base de paramètres et/ou de grandeurs d'état du modèle de la station d'air comprimé (1) et/ou d'enregistrements ou de pronostics de la consommation d'air comprimé.

6. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que**, comme groupe de stratégies de commutation (10) alternatives, des valeurs de pression supérieures (41) ou des valeurs de pression inférieures (42) différentes sont considérées dans le cadre du procédé de simulation préalable (20) comme critère pour le lancement d'une stratégie de commutation (10) définie auparavant.

7. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que**, comme groupe de stratégies de commutation (10) alternatives, pour au moins un des compresseurs mis en réseau entre eux, des valeurs de pression supérieures (41) ou des valeurs de pression inférieures (42) différentes sont considérées dans le cadre du procédé de simulation préalable (20) pour au moins une stratégie de déconnexion (12) définie auparavant ou au moins une stratégie de connexion (13) définie auparavant.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que**, comme groupe de stratégies de commutation (10) alternatives, la connexion ou déconnexion de différents groupes de compresseurs (5a, 5b) est également considérée dans le cas de valeurs de pression supérieures (41)

ou de valeurs de pression inférieures (42) définies ou qui restent à évaluer dans le procédé de simulation préalable (20).

9. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le critère de qualité (22) est défini ou du moins codéterminé de manière prépondérante par une consommation d'énergie la plus faible possible. 5
10. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le procédé de simulation préalable (20) fournit au moins un jeu de données (6) comportant des déroulements temporels futurs pronostiqués des grandeurs d'état du modèle de la station d'air comprimé (1) dans diverses stratégies de commutation (10) à différents moments non absolument équidistants et/ou comportant des coefficients dérivés à partir de ceux-ci, de préférence pour l'ensemble du cycle de commande. 10 15 20
11. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le procédé comprend une adaptation éventuellement automatique du modèle de la station d'air comprimé (1) à des paramètres d'installation actualisés et/ou initialement connus de façon seulement approximative et/ou non réglés exactement. 25
12. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que**, dans le procédé de simulation préalable (20), des grandeurs d'état (56) de système actuelles modifiables de la station d'air comprimé (1) sont prises en compte, et/ou des informations sur les états de fonctionnement de divers compresseurs (2) et/ou également des informations relatives à la modification de la quantité de fluide sous pression (4) dans la station d'air comprimé (1), par exemple le prélèvement de la quantité de fluide sous pression par unité de temps et/ou **en ce que**, dans le procédé de simulation préalable (20), des informations sur la quantité de livraison de fluide sous pression (4) de compresseurs (2) individuels, et/ou sur la puissance absorbée de compresseurs (2) individuels dans différents états de charge, et/ou des informations sur les temps morts des compresseurs (2), et/ou des limites de pression minimales et maximales caractéristiques pour la station d'air comprimé (1) sont prises en compte comme paramètres de système (55) fixes de la station d'air comprimé (1). 30 35 40 45 50
13. Procédé selon l'une des revendications 1 à 12, **caractérisé en ce que** la simulation préalable (20) utilise des routines numériques dotées d'intelligence artificielle et/ou de faculté d'apprentissage, par rapport à l'évolution temporelle du comportement de consommateur eu égard au soutirage de fluide sous pression (4) à partir de la station d'air comprimé (1). 55

14. Procédé selon l'une des revendications précédentes, sachant que le procédé, qui est implémenté dans une commande électronique d'une station d'air comprimé (1), traite comme information d'entrée des informations sur des grandeurs d'état essentielles de la station d'air comprimé (1), et délivre en sortie des ordres de commande pour la commande d'au moins certains compresseurs (2), **caractérisé en ce que** le procédé présente les structures fonctionnelles suivantes :

- un coeur de simulation (70) dans lequel des modèles dynamiques de ces composants sont contenus pour la description du comportement d'au moins certains composants de la station d'air comprimé (1), sachant que le coeur de simulation (70) est configuré de façon qu'il calcule à l'avance, comme résultat de simulation, le déroulement temporel de toutes les grandeurs d'état contenues dans le modèle pour les composants de la station d'air comprimé (1) sur la base de stratégies de commutation (10) alternatives adoptées, sachant que les modèles du coeur de simulation (70) prennent en compte les non-linéarités et/ou instabilités et/ou temps morts essentiels dans le comportement des composants ;

- un coeur d'algorithme (71) qui contient des paramètres pour la caractérisation des composants de la station d'air comprimé (1), des informations de topologie sur l'interconnexion des composants individuels, des heuristiques pour la formation de stratégies de commutation (10) alternatives et des critères d'évaluation pour les déroulements temporels déterminés par le coeur de simulation (70) pour les grandeurs d'état des composants de la station d'air comprimé (1) pour les stratégies de commutation (10) alternatives, et qui sélectionne sur cette base la stratégie de commutation (10) la plus avantageuse relativement et tient à disposition ou remet des ordres de commande correspondants à au moins certains compresseurs (2) ; et

- une base d'informations (72) qui contient aussi, en plus d'une image de processus formée à partir de valeurs de capteur et éventuellement de valeurs d'actionneur mises à disposition par le coeur d'algorithme (71), les résultats de simulation pour des stratégies de commutation (10) alternatives, sachant que la base d'informations (72) représente au moins une partie de la base de données commune de coeur d'algorithme (71) et de coeur de simulation (70) et sert à l'échange de données entre coeur d'algorithme (71) et coeur de simulation (70).

15. Commande d'installation (3) d'une station d'air comprimé (1) qui comprend une pluralité de compres-

seurs (2) mis en réseau entre eux, laquelle peut lancer des stratégies de commutation (10) d'éléments d'actionnement (7) de la station d'air comprimé (1) et/ou de différents compresseurs (2) pour influencer la quantité du fluide sous pression (4) disponible à tout moment pour un ou plusieurs utilisateurs de la station d'air comprimé (1) dans la station d'air comprimé (1) tout autant qu'elle est capable de régler de manière adaptative la quantité de fluide sous pression (4) disponible à tout moment pour un ou plusieurs utilisateurs de la station d'air comprimé (1) à la quantité de soutirage de fluide sous pression (4) à partir de la station d'air comprimé (1) en fonction de conditions de fonctionnement futures, sachant qu'avant la mise en oeuvre d'une stratégie de commutation (10), diverses stratégies de commutation (10) sont examinées dans un procédé de simulation préalable (20) sur la base d'un modèle (21) de la station d'air comprimé (1) et, en fonction d'au moins un critère de qualité (22) défini, la stratégie de commutation (10) la plus avantageuse relativement est sélectionnée à partir des stratégies de commutation (10) et la commande d'installation (3) génère un ordre de commutation (30) sur la base de la stratégie de commutation (10) sélectionnée.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

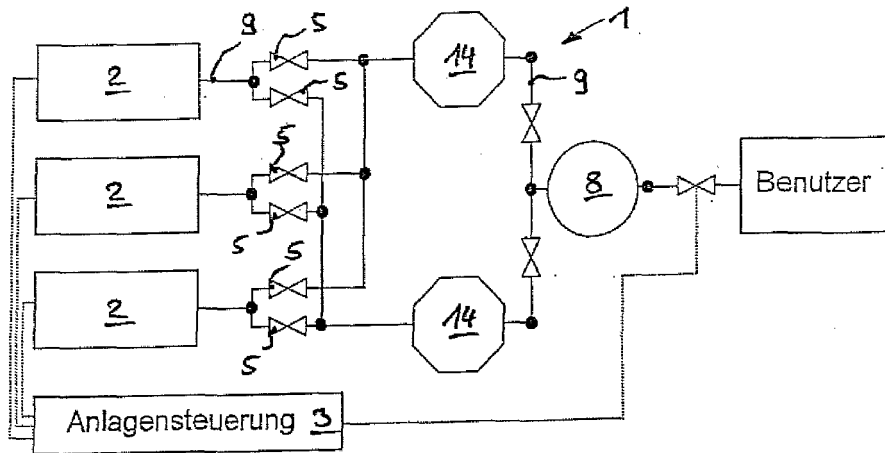


Fig. 1

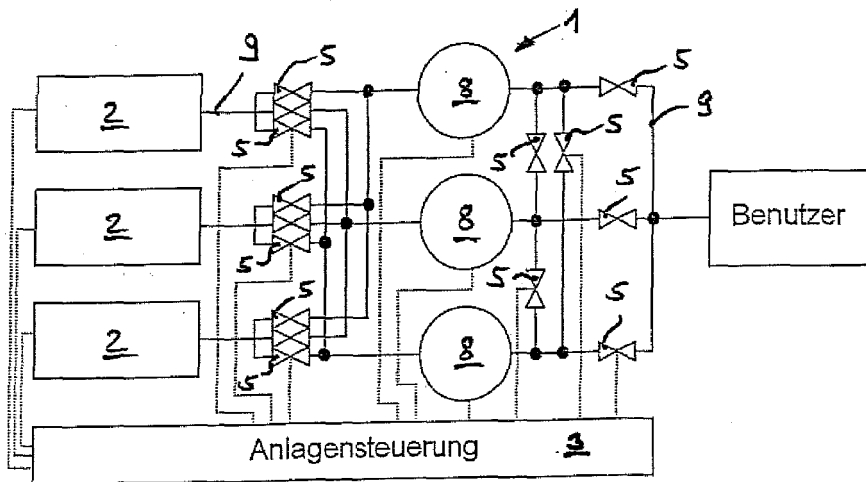


Fig. 2

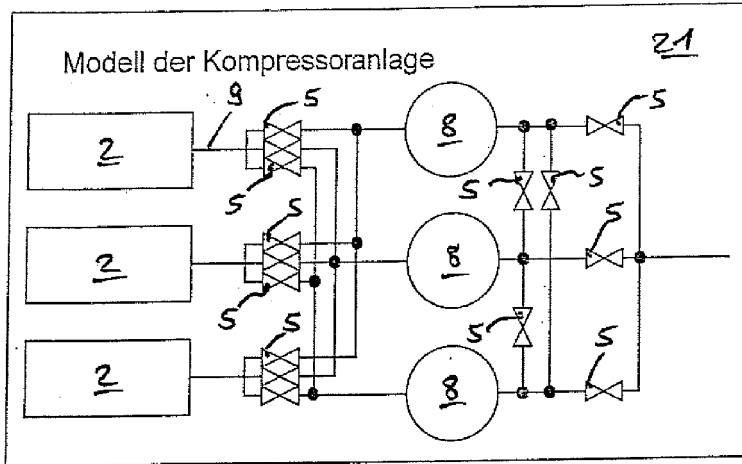


Fig. 3

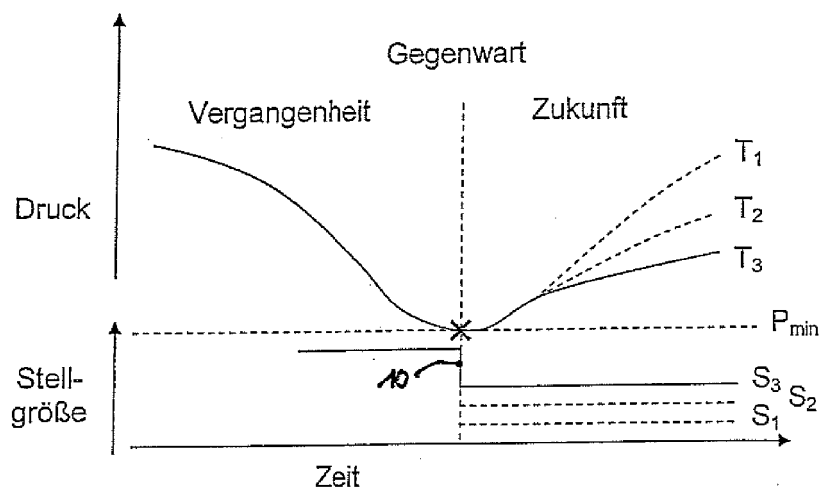


Fig. 4

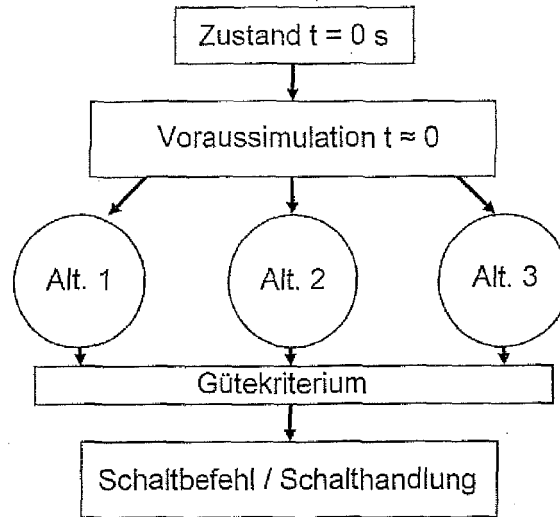


Fig. 5

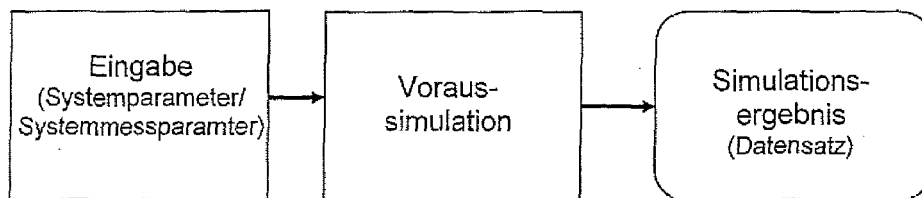


Fig. 6

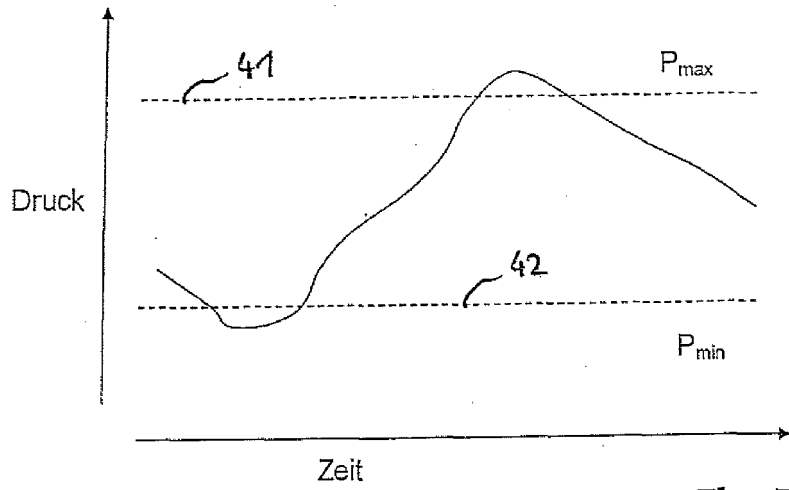


Fig. 7

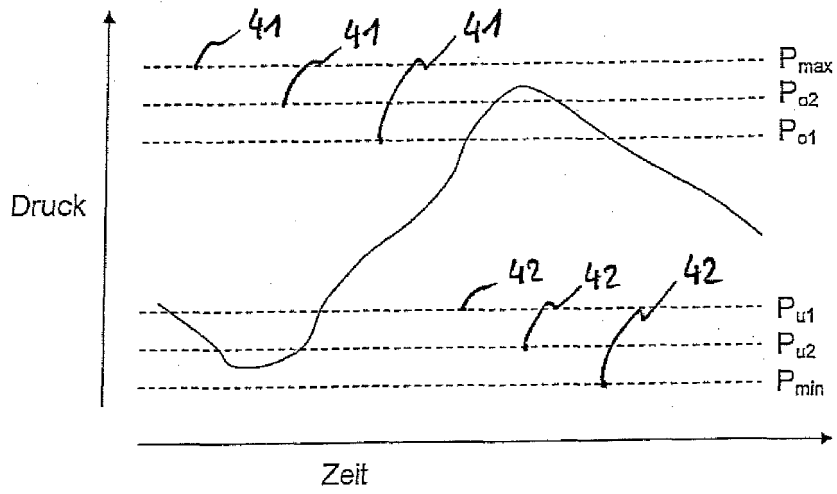


Fig. 8

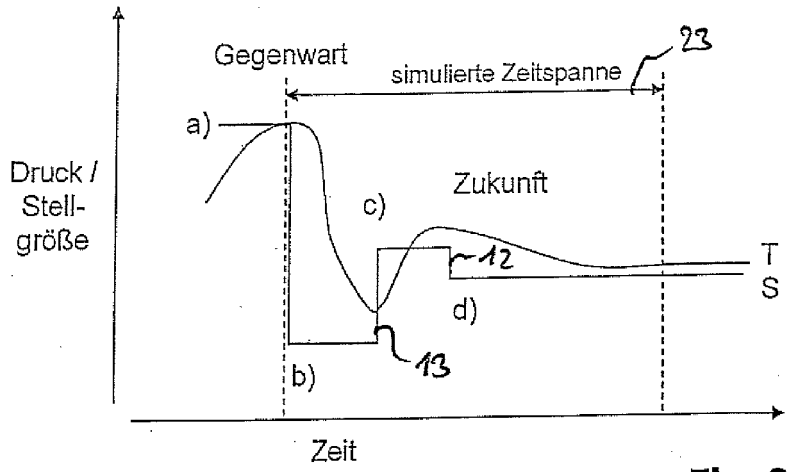


Fig. 9

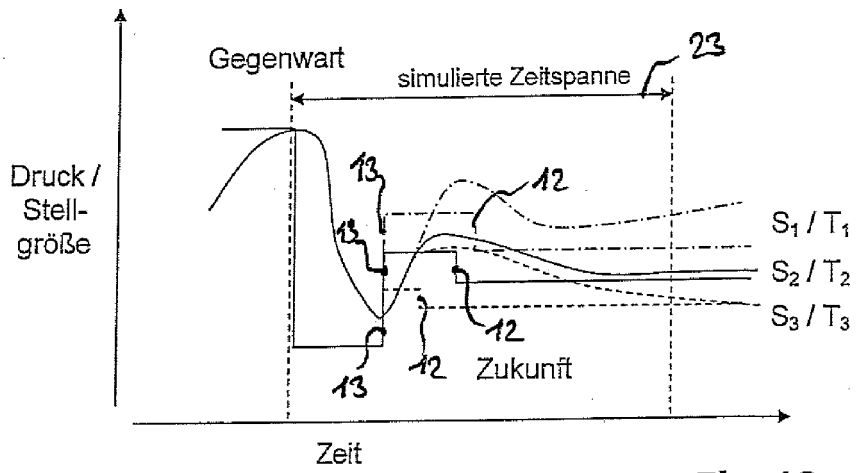


Fig. 10

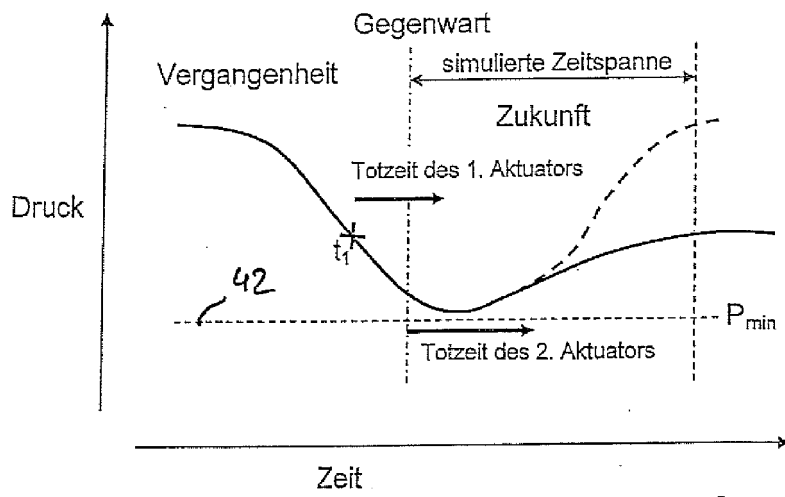


Fig. 11

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 19826169 A1 [0007]