



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
09.09.2015 Patentblatt 2015/37

(51) Int Cl.:
E03B 5/00 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **15000332.5**

(22) Anmeldetag: **05.02.2015**

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

(71) Anmelder: **WILO SE**
44263 Dortmund (DE)

(72) Erfinder: **Büning, Daniel**
44263 Dortmund (DE)

(74) Vertreter: **Cohausz Hannig Borkowski Wißgott Patent- und Rechtsanwaltskanzlei**
Schumannstrasse 97-99
40237 Düsseldorf (DE)

(30) Priorität: **05.02.2014 DE 102014001413**

(54) **Verfahren zur Bestimmung der Systemkennlinie eines Verteilernetzes**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Systemkennlinie (5) eines flüssigkeitsführenden Verteilernetzes (2), das mehrere, insbesondere eine Vielzahl Entnahmestellen (8) aufweist, die von einer Pumpenanlage (3) mit wenigstens einer Pumpe (9) mit einem Förderdruck (p) versorgt werden, wobei ein durchflussabhängiger Anteil der Systemkennlinie (5) durch das Produkt ($R \cdot Q^k$) eines Systemwiderstands (R) und einer Potenz (k) des Durchflusses (Q) beschrieben ist. Im Betrieb der Pumpenanlage (3) werden der Druck (p_{Ei} , p_{ges}) und der Volumenstrom (Q_{Ei} , Q_{ges}) im Verteilernetz (2) jeweils ermittelt, wenn eine erste Entnahmestelle (8, E1), unabhängig davon wenigstens eine zweite Entnahmestelle (8, E $_j$ mit $j = 2 \dots n$), sowie während die erste und die wenigstens eine zweite Entnahmestelle (8, E $_i$ mit $i = 1 \dots n$) gleichzeitig geöffnet sind. Der Systemwiderstand (R) wird aus der Verknüpfung zweier Gleichun-

gen berechnet, wobei die erste Gleichung einen Widerstandskoeffizienten (W_{ges}) einer durch die gleichzeitig geöffnete erste und wenigstens eine zweite Entnahmestelle (8, E $_j$) gebildeten virtuellen Gesamtentnahmestelle auf der Grundlage einer Druckbilanz beschreibt und die zweite Gleichung den Widerstandskoeffizienten (W_{ges}) dieser virtuellen Gesamtentnahmestelle als Parallelschaltung von Widerstandskoeffizienten (W_i) der ersten und der wenigstens einen zweiten Entnahmestelle (8, E $_i$) beschreibt, wobei auch die Widerstandskoeffizienten (W_i) der ersten und der wenigstens einen zweiten Entnahmestelle (8, E $_i$) in der zweiten Gleichung jeweils durch eine Druckbilanz beschrieben sind. Zur Auswertung der jeweiligen Druckbilanz werden der jeweils ermittelte Druck (p_{Ei} , p_{ges}) und der Volumenstrom (Q_{Ei} , Q_{ges}) verwendet.

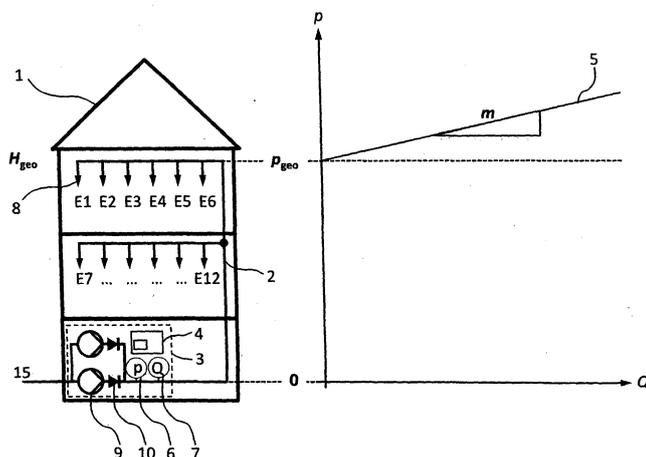


Fig. 1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Systemkennlinie eines flüssigkeitsführenden Verteilernetzes, das mehrere, insbesondere eine Vielzahl Entnahmestellen aufweist, die von einer Pumpenanlage mit wenigstens einer Pumpe mit einem Förderdruck versorgt werden, wobei ein durchflussabhängiger Anteil der Systemkennlinie durch das Produkt eines Systemwiderstands und einer Potenz des Durchflusses beschrieben ist.

[0002] Pumpenanlagen wie zum Beispiel Druckerhöhungsanlagen werden in der Mehrheit so betrieben, dass der Druck am Ausgang der Pumpenanlage auf einen konstanten Wert reguliert wird. Dies ist als p-c-Regelung bekannt ($p_{\text{Soll}} = \text{constant}$). Da die Druckverluste p_v im System aber zusammen mit dem Durchfluss Q ansteigen ($p_v \sim Q$), steht je nach Durchfluss Q unterschiedlich viel Fließdruck p_{FL} zur Nutzung zur Verfügung. Effizienter ist daher ein Solldruckverlauf $p_{\text{Soll}} = f(Q)$ am Ausgang der Druckerhöhungsanlage, der ebenfalls vom Durchfluss abhängt, d.h. eine sogenannte p-v-Regelung. Eine solche ist für den Nutzer auch komfortabler, weil sie zu geringeren Druckschwankungen an den Entnahmestellen führt.

[0003] Für eine geeignete und energieoptimale Einstellung einer p-v-Regelkurve an der Druckerhöhungsanlage ist die Kenntnis der Druckverluste p_v im System erforderlich, d.h. derjenigen Druckverluste, die von der Druckerhöhungsanlage über das Rohrleitungsnetz zur hydraulisch ungünstigsten Entnahmestelle auftreten. Diese ist in der Regel diejenige, die am weitesten von der Pumpenanlage entfernt liegt und/ oder am höchsten liegt. Die Druckverluste p_v lassen sich mathematisch als eine Funktion f mit $p_v = f(Q)$ beschreiben, die jedem Durchfluss Q einen entsprechenden Druckverlust p_v zuordnet. Diese Funktion f wird allgemein als Systemkennlinie oder, soweit sich das Rohrleitungsnetz in einem Gebäude erstreckt, als Gebäudekennlinie bezeichnet. In der Regel wird sie linear oder quadratisch beschrieben, d.h. mit einem durchflussabhängigen Anteil, der durch das Produkt eines Koeffizienten und einer Potenz des Durchflusses gegeben ist, wobei die Potenz im Falle eines linearen Anteils 1 und im Falle eines quadratischen Anteils 2 ist:

Die lineare Systemkennlinie wird durch die lineare Gleichung $p_v = m \cdot Q + p_{\text{geo}}$ beschrieben. Hierfür sind zwei Parameter erforderlich, der p-Achsenabschnitt p_{geo} , der dem statischen Druck an der Pumpenanlage bei einem Rohrleitungsnetz mit einer geodätischen Höhe H_{geo} entspricht, und die Steigung m der Systemkennlinie, die dem Systemwiderstand R entspricht. Dieser beschreibt den linearen Anteil der Systemkennlinie. Rein beispielhaft ist eine lineare Systemkennlinie in Figur 1 rechts dargestellt, wobei der Druck $p = 0$ auf der Höhe der Pumpenanlage 3 und der statische Druck p_{geo} der geodätischen Höhe H_{geo} bei den am höchsten gelegenen Entnahmestellen E1 bis E6 liegt.

[0004] Die quadratische Kennlinie wird durch die quadratische Gleichung $p_v = m \cdot Q^2 + p_{\text{geo}}$ beschrieben. Die Parameter sind ebenfalls der p-Achsenabschnitt p_{geo} und die Steigung m , die hier bewusst auch für eine quadratische Funktion verwendet wird.

[0005] Erst in Kenntnis dieser Systemkennlinie kann eine Regelkurve für die Pumpenanlage festgelegt werden, die eine situationsadäquate, komfortable und energiesparende Betriebsweise ermöglicht. Es ist daher ein Bedürfnis, die Systemkennlinie zu kennen. Grundsätzlich ist es möglich, die Systemkennlinie rein rechnerisch aus den Längen, Durchmesser und Ventilen des Rohrleitungssystems zu ermitteln. Dies ist jedoch kompliziert und zeitaufwändig. Zudem müssen die Berechnungen vollständig wiederholt werden, wenn sich technische Änderungen am System ergeben, beispielsweise wenn eine Entnahmestelle hinzukommt oder sich ein Rohrdurchmesser ändert.

[0006] Es ist daher Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein einfaches Verfahren zur Bestimmung der Systemkennlinie eines Rohrleitungsnetzes zur Verfügung zu stellen, dass schnell und effizient durchgeführt werden kann.

[0007] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen angegeben.

[0008] Erfindungsgemäß wird vorgeschlagen, dass im Betrieb der Pumpenanlage der Druck $p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{En}, p_{\text{ges}}$ und der Volumenstrom $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{\text{ges}}$ im Verteilernetz ermittelt wird während eine erste Entnahmestelle E1 und unabhängig davon wenigstens eine zweite Entnahmestelle E2, ... En sowie während die erste und die wenigstens eine zweite Entnahmestelle E1, E2, ... En gleichzeitig geöffnet sind. Der Systemwiderstand R wird dann aus der Verknüpfung zweier Gleichungen berechnet, wobei die erste Gleichung einen Widerstandskoeffizienten W_{ges} einer durch die gleichzeitig geöffnete erste und wenigstens eine zweite Entnahmestelle E1, E2, ... En gebildeten virtuellen Gesamtentnahmestelle auf der Grundlage einer Druckbilanz beschreibt und die zweite Gleichung den Widerstandskoeffizienten W_{ges} dieser virtuellen Gesamtentnahmestelle als Parallelschaltung von Widerstandskoeffizienten W_1, W_2, \dots, W_n der ersten und der wenigstens einen zweiten Entnahmestelle E1, E2, ... En beschreibt, wobei auch die Widerstandskoeffizienten W_1, W_2, \dots, W_n der ersten und der wenigstens einen zweiten Entnahmestelle E1, E2, ... En in der zweiten Gleichung jeweils durch eine Druckbilanz beschrieben sind. Zur Auswertung der jeweiligen Druckbilanz werden der jeweils ermittelte Druck $p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{En}, p_{\text{ges}}$ und der Volumenstrom $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{\text{ges}}$ verwendet.

[0009] Die Verknüpfung ist vorzugsweise eine Gleichsetzung der ersten Gleichung mit der zweiten Gleichung. Aufgrund dieser Gleichsetzung kann idealerweise ein numerischer Vergleich der ersten und der zweiten Gleichung durchgeführt

werden, bei dem eine numerische Minimalwertsuche erfolgt, wobei der Systemwiderstand R dann hinreichend genau ermittelt ist, wenn die betragliche Differenz der ersten und zweiten Gleichung kleiner gleich ein bestimmter Schwellenwert D_{\min} ist. Vorzugsweise kann zur Berechnung des Systemwiderstands R zunächst ein Startwert für den Systemwiderstand R angenommen wird, und

- a. mit diesem Wert und dem jeweils ermittelten Druck $p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{En}, p_{ges}$ und Volumenstrom $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$ die Widerstandskoeffizienten $W_1, W_2, \dots, W_n, W_{ges}$ der ersten Entnahmestelle E_1 , der wenigstens einen zweiten Entnahmestelle E_1, E_2, \dots, E_n sowie der virtuellen Gesamtentnahmestelle aus den Druckbilanzen und der ersten Gleichung berechnet werden,
- b. anschließend aus den berechneten Widerstandskoeffizienten W_1, W_2, \dots, W_n der ersten und wenigstens einen zweiten Entnahmestelle E_1, E_2, \dots, E_n der Widerstandskoeffizient W_{ges} der virtuellen Gesamtentnahmestelle mit der zweiten Gleichung berechnet wird, und danach
- c. die betragliche Differenz der ersten und der zweiten Gleichung gebildet wird,
- d. wobei die Schritte a., b. und c. mit einem um einen Betrag geänderten Wert für den Systemwiderstand R so lange wiederholt werden, bis die betragliche Differenz der ersten und der zweiten Gleichung kleiner gleich dem Schwellenwert D_{\min} ist.

[0010] Gemäß einer vorteilhaften Variante erfolgt die Ermittlung des Drucks ($p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{En}, p_{ges}$) und/ oder des Volumenstroms $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$ erst nach einer Wartezeit nach dem Öffnen der entsprechende Entnahmestelle E_1, E_2, \dots, E_n , so dass sich das System während der Messung in einem stationären Zustand befindet.

[0011] Beispielsweise kann die Ermittlung des Drucks $p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{En}, p_{ges}$ und/ oder des Volumenstroms $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$ automatisch ausgelöst werden, sobald ein von Null verschiedener und/ oder ein stark ansteigender Volumenstrom $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$ erkannt wird.

[0012] Es ist von Vorteil, wenn für die Ermittlung des Drucks $p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{En}, p_{ges}$ und/ oder des Volumenstroms $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$ an den Entnahmestellen mehrere Werte ermittelt und daraus jeweils ein Einzelwert, insbesondere ein Mittelwert gebildet wird. Schwankungen in den ermittelten Werten werden hierdurch reduziert.

[0013] Vorzugsweise wird die Ermittlung des Drucks $p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{En}, p_{ges}$ und/ oder des Volumenstroms $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$ automatisch beendet, sobald der ermittelte Volumenstrom $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$ unter einen vorbestimmten Minimalwert sinkt, im Wesentlichen Null ist, und/ oder ein stark sinkender Volumenstrom $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$ erkannt wird.

[0014] Erfindungsgemäß können eine Anzahl n von mindestens zwei Entnahmestellen E_1, E_2, \dots, E_n für die Durchführung des Verfahrens verwendet werden. So kann beispielsweise im Betrieb der Pumpenanlage der Druck p_{E3}, \dots, p_{En} und der Volumenstrom Q_{E3}, \dots, Q_{En} im Verteilernetz ermittelt werden, während eine dritte Entnahmestelle E_3 oder eine n -te Entnahmestelle E_n geöffnet ist, wobei bei der Ermittlung des Drucks p_{ges} und des Volumenstroms Q_{ges} während die erste und die wenigstens eine zweite Entnahmestelle E_1, E_2 gleichzeitig geöffnet sind, auch diese dritte Entnahmestelle E_3 ist bzw. alle n verwendeten Entnahmestelle E_1, E_2, \dots, E_n geöffnet sind und einen Teil der virtuellen Gesamtentnahmestelle bildet/ bilden.

[0015] Die Entnahmestellen E_1, E_2, \dots, E_n können jeweils eine physische Entnahmestelle bilden. Es ist jedoch auch möglich, dass die erste Entnahmestelle E_1 eine erste virtuelle Entnahmestelle ist, die durch das gleichzeitige Offensein von zwei oder mehr ersten physischen Entnahmestellen gebildet ist, wobei der Widerstandskoeffizient W_1 der ersten virtuellen Entnahmestelle durch die Parallelschaltung der Widerstandskoeffizienten dieser zwei oder mehr gleichzeitig geöffneten ersten physischen Entnahmestellen beschrieben ist. In entsprechender Weise kann die wenigstens eine zweite Entnahmestelle E_2, \dots, E_n eine zweite virtuelle Entnahmestelle sein, die durch das gleichzeitige Offensein von zwei oder mehr zweiten physischen Entnahmestellen gebildet ist, wobei der Widerstandskoeffizient W_2, \dots, W_n der zweiten virtuellen Entnahmestelle durch die Parallelschaltung der Widerstandskoeffizienten W_2, \dots, W_n dieser zwei oder mehr gleichzeitig geöffneten zweiten physischen Entnahmestellen beschrieben ist,

[0016] Die erste Gleichung kann wie folgt beschrieben sein:

$$W_{ges} = \frac{p_{ges} - p_{geo} - R \cdot Q_{ges}^k}{Q_{ges}^m} \quad \text{Gl. 6'}$$

wobei

- W_{ges} der Widerstandskoeffizient der virtuellen Gesamtentnahmestelle ist,
- p_{ges} der bei den gleichzeitig geöffneten ersten und wenigstens zweiten Entnahmestelle ermittelte Druck ist,
- p_{geo} der Druck der geodätischen Höhe ist,

R der zu bestimmende Systemwiderstand ist,
 Q_{ges} der ermittelte Volumenstrom bei gleichzeitig geöffneter ersten und wenigstens einen zweiten Entnahmestelle ist,
 k die Potenz des durchflussabhängigen Anteils der Systemkennlinie ist, und bevorzugt 1 im Falle eines linearen Anteils oder 2 im Falle eines quadratischen Anteils beträgt,
 m ein festlegbarer Exponent für den Druckverlust der Entnahmestellen ist und bevorzugt 2 beträgt.

[0017] Die zweite Gleichung kann wie folgt beschrieben sein:

$$W_{ges} = \left(\sum_{i=1}^n W_i^{-\frac{1}{m}} \right)^{-m} \quad \text{Gl. 6'}$$

wobei

W_{ges} der Widerstandskoeffizient der virtuellen Gesamtentnahmestelle ist,
 W_i der Widerstandskoeffizient der i -ten Entnahmestelle ist,
 n die Anzahl der verwendeten Entnahmestellen ist,
 m ein festlegbarer Exponent für den Druckverlust der Entnahmestellen ist und bevorzugt 2 beträgt.

[0018] Die Widerstandskoeffizienten W_1, W_2, \dots, W_n können wie folgt beschrieben werden:

$$W_i = \frac{p_{Ei} - p_{geo} - R \cdot Q_{Ei}^k}{Q_{Ei}^m} \quad \text{Gl. 3'}$$

wobei

W_i der Widerstandskoeffizient der i -ten Entnahmestelle ist,
 p_{Ei} der bei geöffneter i -ten Entnahmestelle ermittelte Druck ist,
 p_{geo} der Druck der geodätischen Höhe ist,
 R der zu bestimmende Systemwiderstand ist,
 Q_{Ei} der bei geöffneter i -ten Entnahmestelle ermittelte Volumenstrom ist,
 k die Potenz des durchflussabhängigen Anteils der Systemkennlinie ist und bevorzugt 1 im Falle eines linearen Anteils oder 2 im Falle eines quadratischen Anteils beträgt,
 m ein festlegbarer Exponent für den Druckverlust der Entnahmestellen ist und bevorzugt 2 beträgt.

[0019] Vorzugsweise wird die Pumpenanlage nach der Bestimmung der Systemkennlinie entlang einer Regelkennlinie geregelt, die der um einen gewünschten Fließdruck p_{FL} an den Entnahmestellen entsprechenden Betrag angehobenen Systemkennlinie entspricht.

[0020] Des Weiteren ist es von Vorteil, wenn der ermittelte Wert des Systemwiderstands R als eine zeitliche Funktion $R(t)$ in einer Reglereinheit hinterlegt ist, die eine zeitlich auftretende Widerstandserhöhung im Verteilernetz beschreibt.

[0021] Der Fließdruck p_{FL} kann als eine zeitliche Funktion $p_{FL}(t)$ in der Reglereinheit hinterlegt sein, die den gewünschten Fließdruck p_{FL} zeitabhängig, beispielsweise tageszeitabhängig, tagesabhängig oder saisonabhängig, definiert.

[0022] Für die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird die geodätische Höhe benötigt, die aufgrund der konstruktiven Auslegung des Systems grundsätzlich als bekannt angenommen werden kann. Falls diese nicht bekannt ist, wird ein Verfahren zur Bestimmung des durch eine geodätische Höhe H_{geo} in einem flüssigkeitsführenden Verteilernetz bedingten geodätischen Drucks p_{geo} , insbesondere zur Bestimmung der Systemkennlinie dieses Verteilernetzes gemäß dem vorbeschriebenen Verfahren vorgeschlagen, wobei das Verteilernetz mehrere, insbesondere eine Vielzahl Entnahmestellen aufweist, die von einer Pumpenanlage mit wenigstens einer Pumpe mit einem Förderdruck p versorgt werden, wobei die Pumpenanlage im geschlossenen Zustand aller Entnahmestellen E_1, E_2, \dots, E_n für eine bestimmte Zeitspanne T_{akt} betrieben wird, um einen bestimmten Druck p im Verteilernetz aufzubauen, wobei nach Ablauf der Zeitspanne T_{akt} die am höchsten gelegene Entnahmestelle E_1 geöffnet wird, um den Druck p im Verteilernetz abzubauen, und, sobald keine Flüssigkeit mehr aus der geöffneten Entnahmestelle E_1 austritt, der Druck p am Ausgang der Pumpenanlage ermittelt wird, welcher dem geodätische Druck p_{geo} entspricht.

[0023] Das Verfahren wird nachfolgend anhand eines Ausführungsbeispiels und der beigefügten Figuren näher er-

läutert. Es zeigen:

- Figur 1: Ein Gebäude samt integriertem Rohrleitungsnetz mit Entnahmestellen und Druckerhöhungsanlage und nebenstehendem Diagramm der zugehörigen Systemkennlinie
- Figur 2: Zeitlicher Verlauf von Sensorwerten für Volumenstrom und Druck sowie von der Drehzahl
- Figur 3: Ausgangszustand des Systems
- Figur 4: Geschlossenen System aufladen
- Figur 5: Geschlossenes System entleeren
- Figur 6: Druckaufbau und Entnahme an erster Entnahmestelle
- Figur 7: Druckaufbau und Entnahme an zweiter Entnahmestelle
- Figur 8: Druckaufbau und Entnahme an dritter Entnahmestelle
- Figur 9: Druckaufbau und Entnahme an erster, zweiter und dritter Entnahmestelle gleichzeitig
- Figur 10: Wahl der Regelkennlinie

[0024] Der Einfachheit halber wird beispielhaft eine lineare Systemkennlinie gemäß der Gleichung $p_v = m \cdot Q + p_{geo}$ zu Grunde gelegt. Ferner wird zunächst angenommen, dass der Druck p_{geo} der geodätischen Höhe H_{geo} bekannt ist. Es wird später noch beschrieben, wie auf einfache Weise eine Ermittlung des Drucks p_{geo} der geodätischen Höhe H_{geo} möglich ist.

[0025] Das hier beschriebene Verfahren ermöglicht, die Steigung der Systemkennlinie zu bestimmen, und daraus eine Regeldruckkurve abzuleiten, die eine energieeffiziente Regelung der Druckerhöhungsanlage ermöglicht.

[0026] Figur 1 zeigt ein Gebäude 1, in dem ein flüssigkeitsführendes Rohrleitungsnetz 2 vorhanden ist. Ein Gebäude 1 ist der häufige Fall. Das Verfahren ist aber für alle Verteilungsnetze, auch ohne Gebäude, anwendbar. Das Rohrleitungsnetz 2 ist mit einer zentralen Druckerhöhungsanlage 3 verbunden, die in der Ausführungsvariante gemäß Figur 1 zwei drehzahlgeregelte Pumpen 9 mit jeweils einem in Förderrichtung nachgeschalteten Rückflussverhinderer 10 aufweist. Eine Druckerhöhungsanlage 3 mit nur einer Pumpe 9 ist jedoch ebenfalls möglich. Die Druckerhöhungsanlage 3 ist niederdruckseitig an ein öffentliches Wasserversorgungsnetzwerk angeschlossen. In Figur 1 ist der Übergabepunkt 15 dargestellt. Die Druckerhöhungsanlage 3 umfasst eine Reglereinheit 4 zur Regelung des Ausgangsdrucks p . Sie übernimmt zum Teil aber auch eine Messdatenverarbeitung. Teil der Druckerhöhungsanlage 3 ist ein Drucksensor 6 und ein Volumenstromsensor 7, die ausgangsseitig der Pumpen 9 angeordnet sind und Messwerte der Reglereinheit 4 zuführen.

[0027] Die Reglereinheit 4 hat folglich zumindest die Information des Drucks p am Ausgang der Anlage 3 sowie des Durchflusses Q durch die Anlage 3 zur Verfügung. Es sei angemerkt, dass anstelle einer Messung dieser Größen auch eine rechnerische Ermittlung mittels eines Beobachters möglich ist. Für eine spätere p - v -Regelung sind ohnehin beide Werte notwendig, daher bietet sich eine direkte Einbindung der Messung in die Reglereinheit 4 an. Möglich ist aber genauso, eine der beiden Messgrößen oder beide Messgrößen unabhängig von der Reglereinheit 4 zu bestimmen, und bei Bedarf an die Reglereinheit 4 zu übergeben.

[0028] Das Rohrleitungsnetz 2 weist eine Mehrzahl, insbesondere eine Vielzahl an Entnahmestellen 8 auf, an denen dem Rohrleitungsnetz 2 jeweils Flüssigkeit entnommen werden kann. Die Entnahmestellen 8 können beispielsweise Wasserhähne, Duschköpfe, Badewanneneinläufe, Toilettenspülungen und/ oder Waschmaschinen- oder Spülmaschinenanschlüsse sein, d.h. eine beliebige Wasserarmatur bilden, die geöffnet werden kann und im Normalzustand geschlossen ist. Das Gebäude 1 weist beispielhaft sechs Entnahmestellen E7 bis E12 im Erdgeschoss und sechs Entnahmestellen 8 E1 bis E6 im Obergeschoss auf. Die Entnahmestellen 8 im Obergeschoss befinden sich auf einer geodätischen Höhe H_{geo} .

[0029] Rechts neben dem Gebäude ist ein $H(Q)$ -Diagramm mit einer linearen Gebäudekennlinie 5 dargestellt, die eine vereinfachte Systemkennlinie des Systems bestehend aus Druckerhöhungsanlage 3, Rohrleitungsnetz 2 und Entnahmestellen 8 beschreibt. Die Gebäudekennlinie 5 besitzt einen p -Achsenabschnitt p_{geo} , der dem Druck bei der geodätischen Höhe H_{geo} entspricht. Man kann sich leicht klar machen, dass p_{geo} ein Mindestdruck ist, der aufgebaut werden muss, damit die Wassersäule im Rohrleitungsnetz 2 überhaupt die geodätische Höhe der Entnahmestellen 8 im Obergeschoss erreicht. Liegt der Druck im Rohrleitungsnetz 2 unterhalb p_{geo} , kommt keine Flüssigkeit an den Entnahmestellen E1 bis E6 an. Neben dem Druck p_{geo} der geodätischen Höhe H_{geo} besitzt die Gebäudekennlinie 5 die Steigung m , die dem Systemwiderstand R entspricht. Figur 3 zeigt das Gebäude 1 und $H(Q)$ -Diagramm rechts mit der Pumpenkennlinie 12, die für eine maximale Drehzahl gilt. In Figur 4 ist eine weitere Pumpenkennlinie 13 eingetragen, die bei Doppelpumpenbetrieb mit maximaler Drehzahl gilt.

[0030] Der Systemwiderstand R kann wie folgt ermittelt werden, wobei eine Anzahl n der im System vorhandenen Entnahmestellen 8 verwendet wird. Für alle einzeln und gemeinsam verwendeten Entnahmestellen wird der Druck $p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{En}, p_{ges}$ und der Volumenstrom $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$ bestimmt. Nachfolgend wird das Verfahren mit $n = 3$ Entnahmestellen 8 veranschaulicht:

Zunächst wird im Betrieb der Pumpe 9 der Druck p_{E1} und Volumenstrom Q_{E1} im Rohrleitungsnetz, insbesondere ausgangsseitig der Druckerhöhungsanlage 3 ermittelt, vorzugsweise gemessen, während an nur einer ersten Entnahmestelle 8, Flüssigkeit entnommen wird. Vorzugsweise ist dies bei der Entnahmestelle E1 der Fall, während die anderen Entnahmestellen 8 geschlossen sind. Diese Entnahmestelle E1 ist von der Druckerhöhungsanlage 3 am weitesten weg, so dass bei einer Entnahme an dieser Entnahmestelle die größten Druckverluste im System zu erwarten sind.

[0031] Die Pumpe 9 wird folglich mit einer ersten Drehzahl $n_1 < n_{\max}$, der maximalen Drehzahl, betrieben, bei der die Druckerhöhungsanlage 3 einen entsprechenden Druck im Rohrleitungsnetz 2 größer als p_{geo} aufbaut. Anschließend wird die erste Entnahmestelle E1, d.h. beispielsweise eine dort befindliche Wasserarmatur geöffnet. Dies ist in Figur 6 links dargestellt. Das $H(Q)$ -Diagramm in Figur 6 rechts zeigt die Pumpenkennlinie 12 bei maximaler Drehzahl n_{\max} , sowie diejenige Pumpenkennlinie 11 der ersten Drehzahl n_1 .

[0032] Des Weiteren zeigt Figur 6 die Widerstandskennlinie 14a des Rohrleitungsnetzes 2, auch Rohrnetzparabel genannt, im dargestellten Gebäudezustand mit der Entnahmestelle E1 geöffnet. Es ergibt sich damit ein Betriebspunkt B3 Arbeitspunkt, der den Schnittpunkt zwischen der Widerstandskennlinie 14a und der Pumpenkennlinie 11 bildet. In diesem Betriebspunkt B3 ist der ersten Entnahmestelle E1 der Druck p_{E1} und der Durchfluss Q_{E1} zugeordnet. Letzterer entspricht dem Durchfluss Q_{E1} an der Druckerhöhungsanlage 3, so dass er dort auch gemessen werden kann, insbesondere mittels Volumenstromsensor 7, jedenfalls sofern im System keine Leckage vorliegt. Am Drucksensor 6 der Druckerhöhungsanlage 3 stellt sich zudem der Druck p_{E1} ein.

[0033] Beide Werte werden der Reglereinheit 4 übergeben und in dieser gespeichert. Vorzugsweise werden die Messwerte erst nach einer Wartezeit, insbesondere einigen Sekunden geöffneter Entnahmestelle E1 genommen, um hydraulische Übergangseffekte insbesondere Schwingungen im System auszublenden. Dies gilt für alle Ermittlungen des Drucks p_{E1} , p_{E2} , p_{E3} , p_{ges} und des Volumenstroms Q_{E1} , Q_{E2} , Q_{E3} , Q_{ges} , insbesondere für alle Messungen gleichermaßen.

[0034] Vorzugsweise wird die Ermittlung des Drucks p_{E1} und des Volumenstroms Q_{E1} in der Druckerhöhungsanlage 3 automatisch ausgelöst, sobald ein von Null verschiedener und/ oder ein stark ansteigender Volumenstrom Q_{E1} erkannt wird. Dies kann sowohl bei der ersten Entnahmestelle E1 als auch bei jeder anderen im Verfahren noch zu verwendender Entnahmestelle E2, E3 erfolgen. Ein starker Anstieg des Durchflusses Q ist ein Indiz für eine laufende Entnahme. Durch das Ansteigen des Durchflusses Q kann die Druckerhöhungsanlage 3 folglich selbständig feststellen, wann eine Entnahme stattfindet und wann folgemäßig eine Ermittlung des Volumenstroms Q und des Drucks p durchgeführt werden müssen.

[0035] Für die Ermittlung des Durchflusses Q_{E1} , Q_{E2} , Q_{E3} , Q_{ges} und des Drucks p_{E1} , p_{E2} , p_{E3} , p_{ges} an der ersten Entnahmestelle E1 sowie an allen folgenden Entnahmestellen E2, E3 können mehrere Werte genommen und daraus jeweils ein Einzelwert, insbesondere jeweils ein Mittelwert gebildet werden. Dies entspricht einer Filterung der Werte. Schwankungen bei der rechnerischen Schätzung oder Messung der Werte werden auf diese Weise verringert.

[0036] Die erste Entnahmestelle E1 wird anschließend wieder geschlossen. Auch dies kann in der Druckerhöhungsanlage 3 anhand der Messwerte des Volumenstromsensors 7 erkannt werden, da der Volumenstrom Q unter einen bestimmten Minimalwert, insbesondere auf Null sinkt. Somit kann die Ermittlung des Drucks und des Volumenstroms automatisch an einer Entnahmestelle 8, hier insbesondere an der ersten Entnahmestelle E1 beendet werden, sobald der ermittelte Volumenstrom Q unter einen vorbestimmten Minimalwert sinkt, im Wesentlichen Null ist, und/ oder ein stark sinkender Volumenstrom Q erkannt wird, beispielsweise indem erkannt wird, dass die Ableitung des Volumenstroms Q betragsmäßig einen bestimmten vorgegeben Referenzwert übersteigt.

[0037] Dieselbe Prozedur erfolgt nun an einer zweiten Entnahmestelle 8. Dies ist in Figur 7 veranschaulicht. Hier erfolgt eine Entnahme vorzugsweise an der zweitschlechtesten Entnahmestelle E2, d.h. an der Stelle, an der hydraulische Verluste zu erwarten sind, die nicht so hoch sind, wie bei der ersten Entnahmestelle E1, aber dennoch höher sind, als bei jeder weiteren Entnahmestelle E3-E12. Die Pumpe 9 wird bei derselben Drehzahl n_1 betrieben. Der zweiten Entnahmestelle E2 ist eine eigene Widerstandskennlinie 14b zugeordnet, die aufgrund des etwas kürzeren Rohrnetzwidestands respektive des geringeren Fließwegs von der Druckerhöhungsanlage 3 zur Entnahmestelle E2 flacher ist.

[0038] Es wird nun also im Betrieb der Pumpe 9 der Druck p_{E2} und der Volumenstrom Q_{E2} im Rohrleitungsnetz 2, insbesondere ausgangsseitig der Druckerhöhungsanlage 3 ermittelt, während an nur einer zweiten Entnahmestelle 8, E2 Flüssigkeit entnommen wird, d.h. diese zweite Entnahmestelle E2 geöffnet ist, während alle anderen Entnahmestellen geschlossen sind. Es ergibt sich damit ein Betriebspunkt B4, der den Schnittpunkt zwischen der Widerstandskennlinie 14b und der Pumpenkennlinie 11 bildet. In diesem Betriebspunkt B4 ist der zweiten Entnahmestelle E2 der Druck p_{E2} und der Durchfluss Q_{E2} zugeordnet.

[0039] Die zweite Entnahmestelle E2 wird anschließend wieder geschlossen.

[0040] Das beschriebene Vorgehen kann an einer dritten Entnahmestelle E3 und gegebenenfalls an einer vierten oder weiteren Entnahmestelle 8, E4, ... En fortgeführt werden. Die Entnahme an einer dritten Entnahmestelle 8, E3 ist in Figur 8 veranschaulicht. Sie erfolgt hier beispielhaft an der dritt-schlechtesten Entnahmestelle E3, d.h. an der Stelle,

an der ebenfalls hohe hydraulische Verluste zu erwarten sind, die jedoch nicht so hoch sind, wie bei der zweiten Entnahmestelle E2, aber dennoch höher sind, als bei jeder weiteren Entnahmestelle E4-E12. Die Pumpe 9 wird weiterhin bei derselben Drehzahl n_1 betrieben, so dass sich die Pumpenkennlinie 11 nicht ändert. Der dritten Entnahmestelle E3 ist ebenfalls eine eigene Widerstandskennlinie 14c zugeordnet, die aufgrund des im Vergleich zu den Entnahmen an E1 und E2 geringeren Rohrnetzwidestands respektive des kürzeren Fließwegs von der Druckerhöhungsanlage 3 zur Entnahmestelle E3 flacher als die vorherigen Widerstandskennlinien 14a und 14b ist.

[0041] Es kann nun also im Betrieb der Pumpenanlage 3 auch der Druck $p_{E3} \dots p_{En}$ und der Volumenstrom $Q_{E3} \dots Q_{En}$ im Rohrleitungsnetz 2, insbesondere ausgangsseitig der Druckerhöhungsanlage 3 ermittelt werden, während an nur einer dritten oder weiteren Entnahmestelle 8, E3, ... En Flüssigkeit entnommen wird, d.h. diese dritte oder weitere Entnahmestelle E3, ... En geöffnet ist, während alle anderen Entnahmestellen 8 geschlossen sind. Es ergibt sich damit ein Betriebspunkt B5, der den Schnittpunkt zwischen der Widerstandskennlinie 14c und der Pumpenkennlinie 11 bildet. In diesem Betriebspunkt B5 ist der dritten bzw. weiteren Entnahmestelle E3 der Druck p_{E3} bzw. ... p_{En} und der Durchfluss Q_{E3} bzw. Q_{En} zugeordnet. Die dritte bzw. weitere Entnahmestelle E3, ... En ist dann anschließend wieder zu schließen.

[0042] Für die Parameterermittlung gemäß dem beschriebenen Verfahren ist die Ermittlung des Drucks p_{E3} bzw. ... p_{En} und des Volumenstroms Q_{E3} bzw. Q_{En} an dieser dritten oder weiteren Entnahmestelle 8, E3, ... En nicht erforderlich. Zusätzlich zu den Entnahmen an einzelnen Entnahmestellen 8 schlägt das erfindungsgemäße Verfahren vor, die hydraulischen Größen Druck und Volumenstrom im Betrieb der Pumpe 9 zusätzlich dann zu messen, wenn alle diejenigen Entnahmestellen 8 gleichzeitig geöffnet sind, die bei den anderen Ermittlungen von Druck und Volumenstrom an den einzelnen Entnahmestellen 8 geöffnet waren.

[0043] Es wird nun im Betrieb der Pumpe 9, die vorzugsweise weiterhin mit der ersten Drehzahl n_1 dreht, der Druck p_{ges} und der Volumenstrom Q_{ges} im Rohrleitungsnetz 2, insbesondere ausgangsseitig der Druckerhöhungsanlage 3 ermittelt, während die erste Entnahmestelle E1 und die zumindest eine zweite Entnahmestelle E2 geöffnet sind. Wurden auch der Druck und der Volumenstrom an einer dritten Entnahmestelle E3 ermittelt, so ist auch diese dritte Entnahmestelle E3 gleichzeitig mit den anderen zu öffnen. Dasselbe gilt für eine vierte Entnahmestelle E4, die dann ebenfalls gleichzeitig mit den anderen zu öffnen ist. Dagegen bleiben alle weiteren Entnahmestellen, die nicht geöffnet worden sind und auch nicht geöffnet werden müssen, geschlossen.

[0044] Das Öffnen und Schließen aller verwendeten Entnahmestellen E1, E2, E3 gleichzeitig kann als Öffnen und Schließen einer virtuellen Gesamtentnahmestelle betrachtet werden, der im geöffneten Zustand ebenfalls eine Widerstandskennlinie 14d zugeordnet ist. Diese ist in Figur 9 rechts dargestellt. Sie ist noch flacher als die der ersten, zweiten und dritten Entnahmestelle E1, E2, E3 zugeordneten Widerstandskennlinien 14a, 14b, 14c.

[0045] Wie bei den einzelnen Entnahmestellen E1, E2, E3 ebenfalls, stellt sich im gemeinsam geöffneten Zustand aller zuvor einzeln geöffneten Entnahmestellen E1, E2, E3 ein Druck p_{ges} und ein Volumenstrom Q_{ges} ein, die dieser virtuellen Gesamtentnahmestelle zugeordnet sind und einen Betriebspunkt B4 definieren, der den Schnittpunkt zwischen der Widerstandskennlinie 14d und der Pumpenkennlinie 11 bildet.

[0046] Erfindungsgemäß genügt die Verwendung von zwei Entnahmestellen. Für die Genauigkeit der Parameterbestimmung der Systemkennlinie ist es aber vorteilhaft, möglichst viele Entnahmestellen einzubeziehen, die zunächst einzeln vermessen werden, und dann zusammen geöffnet werden. Bevorzugt wird dabei der Auslegungsdurchfluss des Systems bzw. der maximale Durchfluss der Druckerhöhungsanlage 3 erreicht. Es ist nicht erforderlich, dass die verwendeten Entnahmestellen in einem bestimmten Bezug zueinander stehen, beispielsweise im Verteilernetz unmittelbar benachbart zueinander liegen. Gleichwohl ist eine geeignete Wahl der Entnahmestellen im Hinblick auf die zu erwartenden Druckverluste im Verteilernetz vorteilhaft.

[0047] Zusätzlich zu den einzeln und gemeinsam vermessenen zwei, drei oder gar vier Entnahmestellen E1, E2, E3, E4 können auch andere oder weitere Kombinationen von Entnahmestellen erfasst werden, bei denen noch nicht alle Hähne beteiligt sind. Beispielsweise eine Kombination der zweiten Entnahmestelle E2 mit einer fünften und/oder siebten Entnahmestelle E5, E7, oder eine Kombination der ersten Entnahmestelle E1 mit der dritten, einer fünften und einer achten Entnahmestelle E5, E7. Druck und Volumenstrom können für diese Entnahmestellenkombinationen ebenfalls ermittelt und z.B. für spätere Kontrollrechnungen verwendet werden. Dies ist idealerweise im laufenden Betrieb sinnvoll, wodurch eine kontinuierliche Überprüfung der ursprünglich ermittelten Systemkennlinie durchgeführt werden kann.

[0048] In diesem Zusammenhang sei auch darauf hingewiesen, dass im Sinne der vorliegenden Erfindung unter einer Entnahmestelle 8 sowohl eine physische Entnahmestelle als auch eine virtuelle Entnahmestelle verstanden wird. Mit einer physischen Entnahmestelle ist erfindungsgemäß eine einzelne Stelle im Verteilernetz gemeint, an der Flüssigkeit aus dem Verteilernetz entnommen werden kann, d.h. beispielsweise eine Wasserarmatur. Eine virtuelle Entnahme bezeichnet dagegen in Übereinstimmung mit der bereits genannten virtuellen Gesamtentnahmestelle eine Gruppe von zwei oder mehr Stellen im Verteilernetz, d.h. zwei oder mehr physische Entnahmestellen, die für die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens mathematisch-hydraulisch als eine einzige Entnahmestelle betrachtet werden. Dieser ist dann ebenfalls nur ein einziger Widerstandskoeffizient zugeordnet, der sich aus der Parallelschaltung der Widerstandskoeffizienten der einzelnen Armaturen ergibt.

[0049] In diesem Sinne kann die erste Entnahmestelle 8, E1 eine erste virtuelle Entnahmestelle sein, die durch das

gleichzeitige Offensein von zwei oder mehr ersten physischen Entnahmestellen 8, E1 gebildet ist, wobei der Widerstandskoeffizient W_1 der ersten virtuellen Entnahmestelle 8, E1 durch die Parallelschaltung der Widerstandskoeffizienten dieser zwei oder mehr gleichzeitig geöffneten ersten physischen Entnahmestellen 8, E1 beschrieben ist. Des Weiteren kann auch die wenigstens eine zweite Entnahmestelle 8, E2, ... En eine wenigstens zweite virtuelle Entnahmestelle 8, E2, ... En sein, die durch das gleichzeitige Offensein von zwei oder mehr zweiten physischen Entnahmestellen 8, E2, ... En gebildet ist, wobei der Widerstandskoeffizient W_2, \dots, W_n der zweiten virtuellen Entnahmestelle 8, E2, ... En durch die Parallelschaltung der Widerstandskoeffizienten W_2, \dots, W_n dieser zwei oder mehr gleichzeitig geöffneten zweiten physischen Entnahmestellen 8, E2, ... En beschrieben ist.

[0050] Es sei angemerkt, dass es nicht auf eine bestimmte Reihenfolge bei der Ermittlung des Drucks und Volumenstroms bei den Entnahmestellen 8 ankommt. Es kann folglich sowohl die beschriebene Reihenfolge $E1 > E2 > E3 > E1 + E2 + E3$ verwendet werden, alternativ kann jedoch auch eine beliebige andere Reihenfolge verwendet werden.

[0051] Des Weiteren sei darauf hingewiesen, dass die Pumpe 9 der Druckerhöhungsanlage 3 bei der Entnahme an der jeweiligen Entnahmestelle E1, E2, E3 sowie an allen verwendeten Entnahmestellen $E1 + E2 + E3$ gleichzeitig zwar mit derselben Drehzahl n_1 betrieben werden kann, dies jedoch nicht zwingend der Fall sein muss. Vielmehr kann die Pumpe 9 bei der Entnahme an der jeweiligen Entnahmestelle E1, E2, E3 sowie an allen verwendeten Entnahmestellen $E1 + E2 + E3$ gleichzeitig auch mit unterschiedlichen Drehzahlen betrieben werden. Analog kann auch der Druck am Übergabepunkt des öffentlichen Netzwerks 15 schwanken, ohne die Funktionsweise des hier beschriebenen Verfahrens einzuschränken. Es funktioniert deshalb auch ohne Drehzahlregelung.

[0052] In der Praxis ist aber eine Drehzahlregelung vorhanden, um anschließend die p-v-Regelung umzusetzen. Dann empfiehlt es sich, eine relativ hohe Drehzahl zu verwenden, um relativ große absolute Messwerte mit hoher Genauigkeit zu erhalten. Die Drehzahl n_1 kann dabei so gewählt werden, dass die Nullförderhöhe, d.h. die Förderhöhe H bei Volumenstrom Q gleich Null, bei dieser Drehzahl möglichst hoch ist. Vorzugsweise ist die Drehzahl n aber so gewählt, dass die Nullförderhöhe 90% des maximal zulässigen Systemdrucks nicht überschreitet.

[0053] Alle ermittelten Drücke $p_{E1}, p_{E2}, p_{E3}, p_{ges}$ und Volumenströme $Q_{E1}, Q_{E2}, Q_{E3}, Q_{ges}$ werden in der Reglereinheit 4 abgespeichert. Nach der Ermittlung der Drücke und Volumenströme bei den jeweils geöffneten Entnahmestellen 8 erfolgt die rechnerische Bestimmung des Systemwiderstands R.

[0054] Die ermittelten Werte lassen sich nun in Gleichungen einsetzen, die jeweils den Widerstandskoeffizienten W_1, W_2, W_3, W_{ges} der einzelnen Entnahmestellen 8 bzw. der virtuellen Gesamtentnahmestelle beschreiben. Wie bereits bei den Widerstandskennlinien 14a, 14b, 14c, 14d unterstellt, kann ein quadratischer Entnahmestellenwiderstand W_i , d.h. eine quadratische Abhängigkeit des Drucks vom Volumenstrom angenommen werden, um das Verhalten der Entnahmestellen 8 zu beschreiben.

[0055] Aus einer Druckbilanz im System folgt:

$$p_{Ei} - p_{geo} = \Delta p_{Ei} + \Delta p_{System} \quad \text{Gl. 1}$$

wobei

- p_{Ei} der von der Druckerhöhungsanlage 3 an ihrem Ausgang erzeugte Druck ist, wenn eine Entnahmestelle Ei geöffnet ist,
- p_{geo} der statische Druck der geodätischen Höhe ist,
- Δp_{Ei} der Druckverlust an einer geöffneten Entnahmestelle Ei ist, und
- Δp_{System} der Druckverlust im Rohrleitungsnetzwerk bei einem Volumenstrom Q_i

ist.

[0056] Der Druckverlust Δp_{Ei} an einer geöffneten Entnahmestelle Ei wird in der Regel aus dem Quadrat des dort fließenden Volumenstroms Q_{Ei} mit einem Widerstandskoeffizienten, hier W_i , berechnet, so dass $\Delta p_{Ei} = W_i \cdot Q_{Ei}^2$ ist. Weiterhin ergibt sich der Druckverlust Δp_{System} von der Druckerhöhungsanlage 3 zur jeweiligen Entnahmestelle 8 bei einer geöffneten Entnahmestelle Ei gemäß der ausgewählten Funktion f mit $p_v = f(Q)$, hier beispielhaft also aus dem fließenden Volumenstrom Q_{Ei} linear gewichtet mit dem Systemwiderstand R, so dass $\Delta p_{System} = R \cdot Q_{Ei}$ ist. Es handelt sich hierbei also nur um einen Fließdruckverlust durch Reibung, nicht um statische Druckverluste. Durch Einsetzen dieser Formeln in Gleichung 1 ergibt sich

$$p_{Ei} - p_{geo} = W_i \cdot Q_{Ei}^2 + R \cdot Q_{Ei} \quad \text{Gl. 2}$$

sowie umgestellt nach dem Widerstandskoeffizienten W_i der Entnahmestelle E_i

$$W_i = \frac{p_{Ei} - p_{geo} - R \cdot Q_{Ei}}{Q_{Ei}^2} \quad \text{Gl. 3}$$

[0057] Damit gilt für den der ersten, zweiten und dritten Entnahmestelle E_1 , E_2 , E_3 jeweils zugeordneten Widerstandskoeffizienten W_1 , W_2 , W_3 sowie für den der virtuellen Gesamtentnahmestelle zugeordneten Widerstandskoeffizienten W_{ges} :

$$W_1 = \frac{p_{E1} - p_{geo} - R \cdot Q_{E1}}{Q_{E1}^2} \quad \text{Gl. 4}$$

$$W_2 = \frac{p_{E2} - p_{geo} - R \cdot Q_{E2}}{Q_{E2}^2} \quad \text{Gl. 5}$$

$$W_3 = \frac{p_{E3} - p_{geo} - R \cdot Q_{E3}}{Q_{E3}^2} \quad \text{Gl. 5a}$$

$$W_{ges} = \frac{p_{ges} - p_{geo} - R \cdot Q_{ges}}{Q_{ges}^2} \quad \text{Gl. 6.}$$

[0058] Wird eine andere Funktion f mit $p_v = f(Q)$ für die Systemkennlinie angesetzt als die lineare Funktion in diesem Beispiel, muss der Term für Δp_{System} entsprechend ersetzt werden durch diese ausgewählte Funktion f mit $p_v = f(Q)$, z.B. $p_v = m \cdot Q^2 + p_{geo}$. Es wird deutlich, dass für diese Funktion auch andere Potenzen von Q wie z.B. 1,5 oder auch 0,5 ausgewählt werden können. Es kann sogar eine andere mathematische Funktion ausgewählt werden, die den Volumenstrom Q mit nur einem Parameter m verrechnet.

[0059] Darüber hinaus kann der Widerstandskoeffizient W_{ges} der virtuellen Gesamtentnahmestelle alternativ zu der Beschreibung nach Gleichung 6 als Ersatzwiderstand einer Parallelschaltung der Widerstandskoeffizienten W_1 , W_2 , ... W_n der einzeln geöffneten Entnahmestellen E_i ausgedrückt werden. Es gilt dann:

$$W_{ges} = \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{1}{W_1}} + \sqrt{\frac{1}{W_2}} + \dots + \sqrt{\frac{1}{W_n}}\right)^2} \quad \text{Gl. 7}$$

[0060] An dieser Stelle sei bemerkt, dass auch bei der Funktion für den Druckverlust der Entnahmestelle $\Delta p_{Ei} = f(Q)$ andere Exponenten als das Quadrat ausgewählt werden können. Dementsprechend können alle Quadrate in den Gleichungen 4-7 durch einen festlegbaren Exponenten k sowie die Wurzeln in Gleichung 7 zum Kehrwert dieses ausgewählten Exponenten k ersetzt werden. In der Regel wird für die Beschreibung der Druckverluste einer Entnahmestelle aber der quadratische Exponent $k = 2$ verwendet.

[0061] Gleichung 6 und 7 können gleichgesetzt werden, so dass der unbekannte Widerstandskoeffizient W_{ges} der virtuellen Gesamtentnahmestelle aus der Betrachtung rausfällt und als unbekannte Variablen nur die Widerstandskoeffizienten W_i der Entnahmestellen E_i , mit $i = 1 \dots n$, wobei n die Anzahl der verwendeten Entnahmestellen ist, sowie der Systemwiderstand R bestehen bleiben.

[0062] Es wird deutlich, dass es für das beschriebene Verfahren genügt, nur zwei der Entnahmestellen E_1 , E_2 einzeln sowie zusammen zu öffnen und den sich dann einstellenden Druck und Volumenstrom zu bestimmen. Denn das gleichzeitige Öffensein von mindestens zwei Entnahmestellen eröffnet die Möglichkeit, eine virtuelle Gesamtentnahmestelle mit einem eigenen Widerstandskoeffizienten W_{ges} zu betrachten, der durch eine erste Gleichung, die eine Druckbilanz ausdrückt, und andererseits auch durch eine zweite Gleichung beschrieben werden kann, die eine Parallelschaltung hydraulischer Widerstände beschreibt. Dies ermöglicht es, die Unbekannte W_{ges} zu eliminieren. Es liegen dann nur drei Unbekannte vor, nämlich die Widerstandskoeffizienten W_1 und W_2 sowie der Systemwiderstand R . Für die Bestimmung

dieser drei Unbekannten stehen drei Gleichungen zur Verfügung, nämlich die Gleichungen 4, 5 und nachfolgende Gleichung 8:

$$\frac{p_{ges} - p_{geo} - R \cdot Q_{ges}}{Q_{ges}^2} = \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{1}{W_1}} + \sqrt{\frac{1}{W_2}}\right)^2} \quad \text{Gl. 8.}$$

[0063] Damit ergibt sich ein Gleichungssystem, das lösbar ist. Nachfolgend werden daher nur noch die erste und zweite Entnahmestelle E1, E2 in den Gleichungen betrachtet. Es sei jedoch angemerkt, dass die beschriebene und in Figuren 8 und 9 veranschaulichte Entnahme an der dritten Entnahmestelle E3 zusätzlich hinzugenommen werden könnte, wodurch die Genauigkeit des Verfahrens verbessert wird. Darüber hinaus können auch noch weitere Entnahmestellen berücksichtigt werden.

[0064] Gleichung 8 könnte grundsätzlich analytisch gelöst werden, indem Gleichungen 4 und 5 für W_1 und W_2 eingesetzt und die Gleichung 8 nach R umgestellt wird. Die Lösung der Gleichung für R ist jedoch vergleichsweise aufwändig.

[0065] Bevorzugt wird der Systemwiderstand R deshalb durch einen numerischen Vergleich einer ersten Gleichung mit einer zweiten Gleichung berechnet, wobei die erste Gleichung geeigneterweise Gleichung 6 ist und die zweite Gleichung geeigneterweise Gleichung 7 ist. Es wird folglich ein numerischer Vergleich des auf der rechten Seite von Gleichung 8 stehenden Ausdrucks mit dem auf der linken Seite stehenden Ausdruck der Gleichung 8 durchgeführt. Dieser Vergleich kann durch eine numerische Minimalwertsuche erfolgen, wobei der Systemwiderstand R dann hinreichend genau ermittelt ist, wenn die betragliche Differenz der ersten und zweiten Gleichung Gl. 6, Gl. 7 unterhalb eines bestimmten Schwellenwerts D_{min} liegt, bzw. kleiner gleich diesem Schwellenwert D_{min} ist.

[0066] Mit der Minimalwertsuche wird folglich ein Systemwiderstand R gesucht, der die Bedingung

$$\left| \frac{p_{ges} - p_{geo} - R \cdot Q_{ges}}{Q_{ges}^2} - \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{1}{W_1}} + \sqrt{\frac{1}{W_2}}\right)^2} \right| \leq D_{min}$$

[0067] Der Schwellenwert D_{min} kann vorgegeben werden, und je nach gewünschter Genauigkeit für R beispielsweise 0,1, 0,01 oder 0,001 betragen.

[0068] Bevorzugt werden dabei systematisch Werte für den Systemwiderstand R angesetzt, die Gleichungen 4 und 5 sowie anschließend Gleichungen 6 und 7 berechnet, und die Differenz zwischen Gleichung 6 und 7 betrachtet. Sobald diese Null bzw. minimal wird, ist der angesetzte Wert für den Systemwiderstand R die Lösung.

[0069] Zur Berechnung des Systemwiderstands R wird folglich zunächst ein Startwert für den Systemwiderstand R angenommen, wobei dann

b. mit diesem Wert und dem jeweils ermittelten Druck $p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{En}, p_{ges}$ und Volumenstrom $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$ die Widerstandskoeffizienten $W_1, W_2, \dots, W_n, W_{ges}$ ersten Entnahmestelle E1, der wenigstens einen zweiten Entnahmestelle E2, ...En sowie der virtuellen Gesamtentnahmestelle aus den Druckbilanzen (Gleichungen 4 und 5) und der Gleichung 6 berechnet werden,

c. anschließend aus den berechneten Widerstandskoeffizienten W_1, W_2 der ersten und wenigstens einen zweiten Entnahmestelle E1, E2, , ...En der Widerstandskoeffizient W_{ges} der virtuellen Gesamtentnahmestelle mit der Gleichung 7 berechnet wird, und danach

d. die betragliche Differenz der Gleichungen 6 und 7 gebildet wird,

e. wobei die Schritte a., b. und c. mit einem um einen Betrag geänderten Wert für den Systemwiderstand R so lange wiederholt werden, bis die betragliche Differenz der Gleichungen 6 und 7 kleiner gleich dem Schwellenwert D_{min} ist. Der gesuchte Systemwiderstand R ist damit gefunden.

[0070] In welcher Höhe und Richtung die Änderung des angenommenen Werts für den Systemwiderstand R idealerweise ist, hängt von dem gewählten Algorithmus der Minimumsuche ab. Da Minimumsuchalgorithmen hinlänglich bekannt sind, wird an dieser Stelle auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen.

[0071] Grundsätzlich kann ein beliebiger Startwert verwendet werden, da die Minimumsuche selbstkorrigierend ist.

Da der Systemwiderstand R aber in der Regel innerhalb eines bestimmten bekannten Bereichs, beispielsweise zwischen 0,01 bar pro m^3/h und 1 bar pro m^3/h liegt, kann bevorzugt ein Mittelwert dieses Bereichs als Startwert verwendet werden, damit die Minimumsuche schnell konvergiert, beispielsweise 0,1 bar pro m^3/h .

[0072] Mit dem berechneten Systemwiderstand R ist die in Figur 1 rechts dargestellte Systemkennlinie 5 bekannt und festgelegt, da der Systemwiderstand R der Steigung m entspricht und von einem bekannten Druck p_{geo} der geodätischen Höhe H_{geo} ausgegangen worden ist.

[0073] Der berechnete Systemwiderstand R ist so lange gültig wie das System nicht nennenswert erweitert, umgebaut oder z.B. durch Ablagerungen im Rohrleitungsnetz 2 in seinem Widerstand verändert wird. In der Regel ist dieser Systemwiderstand R also für die Lebensdauer der Anlage gültig, und muss nur einmalig bestimmt werden. Eine zeitlich allmählich auftretende Widerstandserhöhung im Rohrleitungsnetz 2, beispielsweise z.B. in Folge von Ablagerungen, kann durch eine Erhöhung des Systemwiderstands R über die Zeit, d.h. idealerweise über eine zeitliche Funktion $R(t) = a \cdot t + R_{\text{Start}}$, berücksichtigt werden, wobei R_{Start} der zuvor zum Zeitpunkt $t=0$ berechnete Wert des Systemwiderstands R ist und a ein Gewichtungsfaktor darstellt, der den Grad der Erhöhung des Systemwiderstands R pro Zeiteinheit festlegt.

[0074] In Kenntnis des Systemwiderstands R lässt sich nun ein konstanter Fließdruck p_{FL} an den Entnahmestellen 8 erreichen, unabhängig davon, ob viel oder wenig Flüssigkeit gezapft wird, d.h. die Widerstände im Rohrleitungsnetz 2 eher niedrig oder hoch sind.

[0075] Hierzu kann die Systemkennlinie 5 vorzugsweise um einen Betrag parallel nach oben verschoben werden, der dem genannten Fließdruck p_{FL} entspricht. Die Pumpe 9 wird dann nach der Bestimmung der Systemkennlinie 5 vorzugsweise entlang einer Regelkennlinie 16 geregelt, die der um einen einem gewünschten Fließdruck p_{FL} an den Entnahmestellen 8 entsprechenden Betrag angehobenen Systemkennlinie 5 entspricht. Diese Regelkennlinie 16 wird dann in der Reglereinheit 4 eingestellt. Der gewünschte Fließdruck p_{FL} ist ein über den Volumenstrom Q konstanter Druckwert, der jedem Wert der Systemkennlinie 5 hinzuaddiert wird. Dieser Fließdruck p_{FL} kann frei gewählt und jederzeit verändert werden. Die Regelkennlinie 16 wird dann wie folgt beschrieben: $p(Q) = m \cdot Q + p_{\text{geo}} + p_{\text{FL}}$. Die um p_{FL} angehobene Regelkennlinie 16 ist in Figur 10 rechts dargestellt.

[0076] Von besonderem Vorteil ist es, wenn ein gewünschter Fließdruck als zeitliche Funktion $p_{\text{FL}}(t)$ in der Reglereinheit 4 hinterlegt ist. Dies ermöglicht, dass an verschiedenen Tagen oder Saisons bedarfsabhängig verschiedene Fließdrücke von der Pumpenanlage eingestellt werden können, oder sich der Fließdruck auch mit der Zeit erhöht, bzw. absenkt, um z.B. für den Nutzer sanfte Druckübergänge zu gestalten.

[0077] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung kann vorgesehen sein, dass ein maximaler Druckwert p_{max} eingehalten wird, um das System nicht zu überlasten. Es kann daher vor der Einstellung des sich aus der Regelkurve 16 ergebenden, einzuregelnden Druckwerts ein Vergleich durchgeführt werden, ob dieser Druckwert den maximalen Druckwert p_{max} übersteigt. Ist dies der Fall, wird der maximale Druckwert p_{max} gewählt und eingeregelt. Diese Fallunterscheidung kann mit der Minimumfunktion ausgeführt werden: $p(Q) = \min(m \cdot Q + p_{\text{geo}} + p_{\text{FL}}; p_{\text{max}})$. Die Regelkennlinie 16 in Figur 10 rechts ist wie beschrieben maximaldruckbegrenzt.

[0078] Für die Anwendung des beschriebenen Verfahrens wurde zunächst angenommen, dass der Druck p_{geo} der geodätischen Förderhöhe H_{geo} bekannt ist. Ist dies nicht der Fall, muss auch dieser Druck p_{geo} ermittelt werden. Dies kann wie nachfolgend beschrieben, erfolgen.

[0079] Die Druckerhöhungsanlage 3 respektive die Pumpe 9 wird für einen bestimmten Zeitspanne T_{akt} aktiviert und baut einen bestimmten Druck im geschlossenen Rohrleitungsnetz 2 auf. Dieser Druck kann beliebig sein, soweit ein zulässiger Maximaldruck nicht überschritten wird. Das Rohrleitungsnetz 2 wird folglich auf diesen Druck "aufgeladen". Der Druck ist an allen Entnahmestellen 8 gleich. Dieser Zustand ist in Figur 4 dargestellt, wobei hier angenommen ist, dass die Pumpe 9 mit maximaler Drehzahl betrieben wird. Es ergibt sich dann ein Betriebspunkt B1, der bei $Q = 0$ und dem entsprechenden maximal erreichbaren Druck auf der Pumpenkennlinie mit maximaler Drehzahl 11 liegt. Nach Ablauf der Zeitspanne T_{akt} stellt sich die Pumpe 9 bzw. die Druckerhöhungsanlage 3 wieder automatisch ab. Aufgrund der Rückflussverhinderer 10 bleibt der aufgebaute Druck bestehen.

[0080] Es wird nun diejenige Entnahmestelle 8 geöffnet, die am höchsten gelegen ist. Dies ist in dem Ausführungsbeispiel gemäß der Figuren eine der sechs Entnahmestellen 8 im Obergeschoss des Gebäudes 1. Wie zuvor bei dem Verfahren zur Bestimmung des Systemwiderstands R beschrieben, kann die erste Entnahmestelle E1 verwendet werden, da sie die zu der Druckerhöhungsanlage 3 am höchsten und weitesten weg gelegene Entnahmestelle ist. Durch das Öffnen der ersten Entnahmestelle E1 entspannt sich der Druck und die in dem Rohrleitungsnetz 2 geführte Flüssigkeit läuft aus, solange an der ersten Entnahmestelle E1 ein Mediendruck über Übergebungsdruck herrscht. Figur 5 veranschaulicht, wie sich der Betriebspunkt B1 durch das Auslaufen der Flüssigkeit verändert.

[0081] Es sei angemerkt, dass hier von einem "Betriebspunkt" die Rede ist, wenngleich es keinen aktiven Betrieb der Druckerhöhungsanlage 3 gibt. Als Betriebspunkt im Sinne der Erfindung wird daher auch ein Systemzustand bezeichnet. Da das Rohrleitungsnetz 2 keine Flüssigkeit fördert, sich der in ihm befindliche Druck aber abbaut, bewegt sich der Betriebspunkt entlang der p -Achse nach unten. Läuft keine Flüssigkeit mehr aus der ersten Entnahmestelle E1, ist das Rohrleitungsnetz 2 vollständig entspannt und die erste Entnahmestelle E1 kann wieder geschlossen werden. Es ruht dann in der Steigleitung eine Wassersäule, die bis an die erste Entnahmestelle E1 heranreicht. Durch die Öffnung zur

Atmosphäre erfährt diese Wassersäule keinen statischen Druck. In diesem Zustand, der durch den Betriebspunkt B2 in Figur 5 gekennzeichnet ist, entspricht der Druck am Ausgang der Druckerhöhungsanlage 3 genau dem geodätischen Druck p_{geo} .

[0082] Dieser wird nun von der Druckerhöhungsanlage 3 gemessen und in der Reglereinheit 4 abgespeichert. Er steht dann für das Verfahren zur Ermittlung des Systemwiderstands R zur Verfügung.

[0083] Es wird daher erfindungsgemäß ein Verfahren zur Bestimmung des durch eine geodätische Höhe H_{geo} in einem flüssigkeitsführenden Rohrleitungsnetz 2 bedingten geodätischen Drucks p_{geo} , insbesondere zur Bestimmung der Systemkennlinie 5 dieses Rohrleitungsnetzes 2 gemäß dem beschriebenen Verfahren, wobei das Rohrleitungsnetz 2 mehrere, insbesondere eine Vielzahl Entnahmestellen 8 aufweist, die von einer Druckerhöhungsanlage 3 mit wenigstens einer drehzahlgeregelten Pumpe 9 mit einem Förderdruck p versorgt werden können, und die Pumpe 9 im geschlossenen Zustand aller Entnahmestellen 8 für eine bestimmte Zeitspanne T_{akt} betrieben wird, um einen bestimmten Druck p im Rohrleitungsnetz 2 aufzubauen, wobei nach Ablauf der Zeitspanne T_{akt} die am höchsten gelegene Entnahmestelle 8, E1 geöffnet wird, um den Druck p im Rohrleitungsnetz 2 abzubauen, und der geodätische Druck p_{geo} dann am Ausgang der Druckerhöhungsanlage 3 gemessen wird, wenn keine Flüssigkeit mehr aus der geöffneten Entnahmestelle 8, E1 austritt.

[0084] Das beschriebene Aufladen des Rohrleitungsnetzes 2 bietet vorteilhafterweise die Möglichkeit, es auf Dichtheit zu prüfen. Sofern sich der aufgebaute Druck langsam abbaut, ohne dass eine Entnahmestelle 8 geöffnet ist, liegt eine Leckage vor, die auf eine Undichtigkeit des Systems hindeutet. Die Leckageverluste sind folglich als Abbau des Drucks im System gut sichtbar. Vorzugsweise kann vorgesehen sein, dass diese Druckverluste von der Druckerhöhungsanlage 3 direkt angezeigt werden, so dass im Falle von Leckagen das System daraufhin überprüft und optimiert werden kann.

[0085] Für die Durchführung des beschriebenen Verfahrens sollte das System aber bevorzugt vollständig entlüftet und vollständig geschlossen sein, so dass es zu keiner Leckage kommt. Als weitere Schutzmaßnahme sollte ein eventuell vorhandenes Ausdehnungsgefäß der Pumpenanlage 3 während des Verfahrens, insbesondere bei der Bestimmung des Drucks p_{geo} der geodätischen Höhe H_{geo} abgesperrt werden.

[0086] Wie beschrieben, ist es bei den erfindungsgemäßen Verfahren mehrmals erforderlich, zu bestimmten Zeitpunkten den Druck und den Volumenstrom im Rohrleitungsnetz 2 zu ermitteln, insbesondere zu messen. Diese Zeitpunkte können durch einen Anwender manuell vorgegeben werden, beispielsweise in dem er an der Druckerhöhungsanlage 3, insbesondere an ihrer Reglereinheit 4 einen bestimmten erreichten Systemzustand quittiert. Da der Anwender jedoch dann zwischen der Druckerhöhungsanlage 3 und der bzw. den Entnahmestellen 8 hin und her laufen muss, ist dies eine umständliche Vorgehensweise. Alternativ kann der Anwender dem Pumpenaggregat eine Bestätigung eines Systemzustands aus der Ferne zukommen lassen, beispielsweise kabelgebunden oder per Funk mittels eines mobilen Geräts, das in der Lage ist, der Druckerhöhungsanlage 3 eine entsprechende Nachricht zu übermitteln. Auch dies ist allerdings aufwändig und erfordert das genannte mobile Gerät.

[0087] Es ist daher von Vorteil, wenn die Druckerhöhungsanlage 3 selbsttätig erkennt, wann es eine Ermittlung des Druck und des Volumenstroms durchführen soll, bzw. für den Fall, dass Druck und Volumenstrom kontinuierlich gemessen werden, wann ein entsprechender Messwert für einen bestimmten Systemzustand übernommen werden soll. Dies kann vorzugsweise dadurch geschehen, dass die Druckerhöhungsanlage 3 bzw. ihre Reglereinheit 4 die Volumenstrommesswerte überwacht und die Änderung des Systemzustands aus einer steilen Flanke in den Volumenstrommesswerten entnimmt. Dies kann dann als Auslöser für eine Messwertübernahme dienen.

[0088] So kann die Ermittlung des Drucks $p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{En}, p_{\text{ges}}$ und/ oder des Volumenstroms $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{\text{ges}}$ automatisch ausgelöst werden, sobald ein von Null verschiedener und/ oder ein stark ansteigender Volumenstrom $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{\text{ges}}$ erkannt wird. Entsprechend kann die Ermittlung des Drucks $p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{En}, p_{\text{ges}}$ und/ oder des Volumenstroms $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{\text{ges}}$ automatisch beendet wird, sobald ein von Volumenstrom $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{\text{ges}}$ von Null, im Wesentlichen Null, und/ oder ein stark sinkender Volumenstrom $Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{\text{ges}}$ erkannt wird.

[0089] Die Reglereinheit 4 kann hierfür einen Assistenten-Modus aufweisen, mit dem das System die einzelnen Schritte und Zustände nacheinander durchläuft. Dieser kann beispielsweise bei der Inbetriebnahme der Druckerhöhungsanlage 3 aktiviert werden. Der Assistenten-Modus erkennt anhand charakteristischer Verläufe von Druck und Volumenstrom selbst, wann relevante Systemwerte angefahren werden, und speichert Messwerte für Druck und Volumenstrom auch selbstständig ab.

[0090] Das Bild 2 zeigt einen beispielhaften Verlauf der Sensorgrößen Volumenstrom Q_{Sensor} , Druck p_{Sensor} sowie der daraufhin eingestellten Drehzahl n_{Pumpe} der Pumpe 9 über die Zeit. Dies wird nachfolgend erläutert.

[0091] Nach der Aktivierung des Assistenten-Modus zum Zeitpunkt t_0 wird das System aufgeladen. Hierzu wird die Pumpe 9 für den Zeitraum T_{akt} mit maximaler Drehzahl n_{max} betrieben, wodurch sich ein entsprechender Druck aufbaut. Dieser bleibt weitestgehend auch bestehen, wengleich es infolge von Leckagen im Rohrleitungsnetz 2 zu einem geringfügigen Druckabbau kommt. Zum Zeitpunkt t_1 öffnet nun ein Anwender die erste Entnahmestelle E1, was zu einem schnellen Druckabbau führt. Der Beginn dieses Zeitraums wird durch das Abfallen des Drucks erkannt, siehe t_1 in Bild 2. Die Druckerhöhungsanlage 3 erkennt diesen schnellen Druckabbau aufgrund der schnell fallenden Messwerte und speichert wenige Zeit später innerhalb des Zeitabschnitts T1 den am Ausgang der Druckerhöhungsanlage 3 anliegenden

Druck p_{Sensor} als geodätischen Druck p_{geo} ab.

[0092] Zum Zeitpunkt t_2 wird die Pumpe 9 von der Reglereinheit 4 erneut betrieben, diesmal mit einer Drehzahl, die geringer als die Maximaldrehzahl ist. Hiermit wird Zeitraum T2 eingeleitet. Die weiterhin geöffnete Entnahmestelle E1 wird daraufhin durchströmt, wodurch ein entsprechender steiler Anstieg des Volumenstroms Q_{Sensor} erfolgt. Die Reglereinheit 4 misst nun selbsttätig innerhalb des Zeitraums T2 die der ersten Entnahmestelle E1 zugeordneten Werte für Druck p_{Sensor} und Volumenstrom Q_{Sensor} . Zum Zeitpunkt t_3 wird die erste Entnahmestelle E1 vom Anwender wieder geschlossen. Die Druckerhöhungsanlage 3 erkennt dies daran, dass der Volumenstrom Q_{Sensor} auf Null fällt.

[0093] Zum Zeitpunkt t_4 wird die Pumpe 9 noch immer mit derselben Drehzahl betrieben. Der Anwender öffnet die zweite Entnahmestelle E2, wodurch wieder ein entsprechender steiler Anstieg des Volumenstroms Q_{Sensor} erfolgt und der Zeitraum T3 eingeleitet wird. Dieser Anstieg wird von der Druckerhöhungsanlage 3 wieder selbständig erkannt, so dass sie selbsttätig innerhalb des Zeitraums T3 die der zweiten Entnahmestelle E2 zugeordneten Werte für Druck p_{Sensor} und Volumenstrom Q_{Sensor} messen kann. Zum Zeitpunkt t_5 wird die zweite Entnahmestelle E2 vom Anwender wieder geschlossen. Die Druckerhöhungsanlage 3 erkennt dies erneut daran, dass der Volumenstrom Q_{Sensor} auf Null fällt.

[0094] Dieselbe Verfahrensweise wird nun noch mit der dritten Entnahmestelle E3 durchgeführt. Die Druckerhöhungsanlage erkennt den steilen Anstieg des Volumenstroms zum Zeitpunkt t_6 und ermittelt Druck und Volumenstrom innerhalb des laufenden Zeitraums T4.

[0095] Durch das zusätzliche Öffnen der zweiten Entnahmestelle E2 zum Zeitpunkt t_7 wird der Zeitraum T4 beendet und der Zeitraum T5 begonnen. Durch das zusätzliche Öffnen der ersten Entnahmestelle E1 zum Zeitpunkt t_8 wird der Zeitraum T5 beendet und der Zeitraum T6 begonnen. Beides wird jeweils durch die steilen Flanken im Messsignal des Volumenstromsensors von der Druckerhöhungsanlage 3 erkannt.

[0096] Anhand der Tatsache, dass es zuvor zweimal eine steigende und eine darauffolgende fallende Flanke im Volumenstrom gab, nämlich zu Beginn der Zeiträume T2 und T3, aber auf die nächste steigende Flanke keine fallende Flanke folgte, weiß die Druckerhöhungsanlage 3, dass drei Entnahmestellen E1, E2, E3 verwendet werden. Damit ist der Druckerhöhungsanlage auch bekannt, dass in dem sich an den Zeitpunkt t_8 anschließenden Zeitraum T6 alle drei Entnahmestellen E1, E2, E3 geöffnet sind, so dass in diesem Zeitraum T6 der Druck- und der Volumenstrommesswert für die virtuelle Gesamtentnahmestelle übernommen werden kann. Der Beginn dieser Zeitspanne T6 wird also durch das mehrfache Ansteigen des Durchflusses erkannt.

[0097] Die Entnahmestellen E1, E2, E3 werden dann nacheinander wieder geschlossen, was die Druckerhöhungsanlage 3 anhand der steil fallenden Volumenströme erkennt.

[0098] Die Sensorwerte aus den Zeiträumen T1, T2, T3, T4 und T6 werden in der Reglereinheit 4 abgespeichert und anschließend für die Berechnung des Systemwiderstands R verwendet. Innerhalb der genannten Zeiträume können auch mehrere Werte zu einem gemittelten Wert verrechnet werden. Durch den beschriebenen Assistenten-Modus ist es nicht mehr erforderlich, dass der Anwender, nach dem Öffnung und/ der Schließen einer Entnahmestelle an der Druckerhöhungsanlage etwas zu quittieren. Die Messungen können folglich sehr komfortabel durchgeführt werden.

Bezugszeichenliste

[0099]

1	Gebäude
2	Verteilernetz
3	Pumpenanlage
4	Reglereinheit
5	Systemkennlinie, Gebäudekennlinie
6	Drucksensor
7	Volumenstromsensor
8	Entnahmestelle
9	Pumpe
10	Rückflussverhinderer
11	Pumpenkennlinie
12	Pumpenkennlinie für maximale Drehzahl
13	Pumpenkennlinie für maximale Drehzahl im Doppelpumpenbetrieb
14a, 14b, 14c, 14d	Widerstandskennlinie
15	Übergabepunkt des öffentlichen Netzwerks
16	Regelkurve

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung der Systemkennlinie (5) eines flüssigkeitsführenden Verteilernetzes (2), das mehrere, insbesondere eine Vielzahl Entnahmestellen (8) aufweist, die von einer Pumpenanlage (3) mit wenigstens einer Pumpe (9) mit einem Förderdruck (p) versorgt werden, wobei ein durchflussabhängiger Anteil der Systemkennlinie (5) durch das Produkt ($R \cdot Q^k$) eines Systemwiderstands (R) und einer Potenz (k) des Durchflusses (Q) beschrieben ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Betrieb der Pumpenanlage (3) der Druck ($p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{En}, p_{ges}$) im Verteilernetz (2) und der Volumenstrom ($Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$) im Verteilernetz (2) ermittelt wird während eine erste Entnahmestelle (8, E1) und unabhängig davon wenigstens eine zweite Entnahmestelle (8, E2, ... En), sowie während die erste und die wenigstens eine zweite Entnahmestelle (8, E1, E2, ... En) gleichzeitig geöffnet sind, und dass der Systemwiderstand (R) aus der Verknüpfung zweier Gleichungen (Gl. 6, 6', Gl. 7, 7') berechnet wird, wobei die erste Gleichung (Gl. 6, 6') einen Widerstandskoeffizienten (W_{ges}) einer durch die gleichzeitig geöffnete erste und wenigstens eine zweite Entnahmestelle (8, E1, E2, ... En) gebildeten virtuellen Gesamtentnahmestelle auf der Grundlage einer Druckbilanz beschreibt und die zweite Gleichung (Gl. 7, 7') den Widerstandskoeffizienten (W_{ges}) dieser virtuellen Gesamtentnahmestelle als Parallelschaltung von Widerstandskoeffizienten (W_1, W_2, \dots, W_n) der ersten und der wenigstens einen zweiten Entnahmestelle (8, E1, E2, ... En) beschreibt, wobei auch die Widerstandskoeffizienten (W_1, W_2, \dots, W_n) der ersten und der wenigstens einen zweiten Entnahmestelle (8, E1, E2, ... En) in der zweiten Gleichung (Gl. 7, 7') jeweils durch eine Druckbilanz beschrieben sind, und zur Auswertung der jeweiligen Druckbilanz der jeweils ermittelte Druck ($p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{En}, p_{ges}$) und der Volumenstrom ($Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$) verwendet werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Verknüpfung eine Gleichsetzung der ersten Gleichung (Gl. 6) mit der zweiten Gleichung (Gl. 7, 7') ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein numerischer Vergleich der ersten und der zweiten Gleichung (Gl. 6, 6', Gl. 7, 7') durchgeführt wird, bei dem eine numerische Minimalwertsuche erfolgt, wobei der Systemwiderstand (R) dann hinreichend genau ermittelt ist, wenn die betragliche Differenz der ersten und zweiten Gleichung (Gl. 6, 6', Gl. 7, 7') kleiner gleich ein bestimmter Schwellenwert (D_{min}) ist.
4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Berechnung des Systemwiderstands (R) zunächst ein Startwert für den Systemwiderstand (R) angenommen wird, und
- a. mit diesem Wert und dem jeweils ermittelten Druck ($p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{En}, p_{ges}$) und Volumenstrom ($Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$) die Widerstandskoeffizienten ($W_1, W_2, \dots, W_n, W_{ges}$) der ersten Entnahmestelle (8, E1), der wenigstens einen zweiten Entnahmestelle (8, E1, E2, ... En) sowie der virtuellen Gesamtentnahmestelle aus den Druckbilanzen und der ersten Gleichung (Gl. 6, 6') berechnet werden,
 - b. anschließend aus den berechneten Widerstandskoeffizienten (W_1, W_2, \dots, W_n) der ersten und wenigstens einen zweiten Entnahmestelle (8, E1, E2, ... En) der Widerstandskoeffizient (W_{ges}) der virtuellen Gesamtentnahmestelle mit der zweiten Gleichung (Gl. 7, 7') berechnet wird, und danach
 - c. die betragliche Differenz der ersten und der zweiten Gleichung (Gl. 6, 6', Gl. 7, 7') gebildet wird,
 - d. wobei die Schritte a., b. und c. mit einem um einen Betrag geänderten Wert für den Systemwiderstand (R) so lange wiederholt werden, bis die betragliche Differenz der ersten und der zweiten Gleichung (Gl. 6, 6', Gl. 7, 7') kleiner gleich dem Schwellenwert (D_{min}) ist.
5. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Druck (p) und der Volumenstrom (Q) ausgangsseitig der Pumpenanlage (3) ermittelt wird.
6. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste Entnahmestelle (8) diejenige ist, bei der die größten Druckverluste entlang des Verteilernetzes (2) zu erwarten sind.
7. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die zweite Entnahmestelle (8) diejenige ist, bei der die zweit-größten Druckverluste entlang des Verteilernetzes (2) zu erwarten sind.
8. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ermittlung des Drucks ($p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{En}, p_{ges}$) und/ oder des Volumenstroms ($Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$) automatisch ausgelöst wird, sobald ein von Null verschiedener und/ oder ein stark ansteigender Volumenstrom ($Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$) erkannt wird.
9. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ermittlung des Drucks ($p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{En}, p_{ges}$) und/ oder des Volumenstroms ($Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$) automatisch beendet wird, sobald der

ermittelte Volumenstrom ($Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$) unter einen vorbestimmten Minimalwert sinkt, im Wesentlichen Null ist, und/ oder ein stark sinkender Volumenstrom ($Q_{E1}, Q_{E2}, \dots, Q_{En}, Q_{ges}$) erkannt wird.

5 10. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Betrieb der Pumpenanlage (3) der Druck (p_{E3}, \dots, p_{En}) und Volumenstrom (Q_{E3}, \dots, Q_{En}) im Verteilernetz (2) ermittelt wird, während eine dritte Entnahmestelle (8, E3) oder eine n-te Entnahmestelle (8, En) geöffnet ist, wobei bei der Ermittlung des Drucks (p_{ges}) und des Volumenstroms (Q_{ges}) während die erste und die wenigstens eine zweite Entnahmestelle (8, E1, E2) gleichzeitig geöffnet sind, auch diese dritte Entnahmestelle (8, E3) geöffnet ist bzw. alle n verwendeten Entnahmestellen (E1, E2, ... En) geöffnet sind und einen Teil der virtuellen Gesamtentnahmestelle bildet/ bilden.

15 20 11. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste Entnahmestelle (8, E1) eine erste virtuelle Entnahmestelle ist, die durch das gleichzeitige Offensein von zwei oder mehr ersten physischen Entnahmestellen gebildet ist, und der Widerstandskoeffizient (W_1) der ersten virtuellen Entnahmestelle durch die Parallelschaltung der Widerstandskoeffizienten dieser zwei oder mehr gleichzeitig geöffneten ersten physischen Entnahmestellen beschrieben ist, und/ oder dass die wenigstens eine zweite Entnahmestelle (8, E2, ... En) eine virtuelle Entnahmestelle ist, die durch das gleichzeitige Offensein von zwei oder mehr zweiten physischen Entnahmestellen gebildet ist, und der Widerstandskoeffizient (W_2, \dots, W_n) der zweiten virtuellen Entnahmestelle durch die Parallelschaltung der Widerstandskoeffizienten (W_2, \dots, W_n) dieser zwei oder mehr gleichzeitig geöffneten zweiten physischen Entnahmestellen beschrieben ist.

25 12. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste Gleichung wie folgt beschrieben wird:

$$W_{ges} = \frac{p_{ges} - p_{geo} - R \cdot Q_{ges}^k}{Q_{ges}^m}$$

30 wobei

35 W_{ges} der Widerstandskoeffizient der virtuellen Gesamtentnahmestelle ist,
 p_{ges} der bei den gleichzeitig geöffneten ersten und wenigstens zweiten Entnahmestelle ermittelte Druck ist,
 p_{geo} der Druck der geodätischen Höhe ist,
 R der zu bestimmende Systemwiderstand ist,
 Q_{ges} der ermittelte Volumenstrom bei gleichzeitig geöffneten ersten und wenigstens einen zweiten Entnahmestelle ist,
 k die Potenz des durchflussabhängigen Anteils der Systemkennlinie (5) ist, und bevorzugt 1 oder 2 beträgt,
 m ein festlegbarer Exponent für den Druckverlust der Entnahmestellen (8) ist und bevorzugt 2 beträgt.

40 13. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die zweite Gleichung wie folgt beschrieben wird:

$$W_{ges} = \left(\sum_{i=1}^n W_i^{-\frac{1}{m}} \right)^{-m}$$

50 wobei

55 W_{ges} der Widerstandskoeffizient der virtuellen Gesamtentnahmestelle ist,
 W_i der Widerstandskoeffizient der i-ten Entnahmestelle (8) ist,
 n die Anzahl der verwendeten Entnahmestellen (8) ist,
 m ein festlegbarer Exponent für den Druckverlust der Entnahmestellen (8) ist und bevorzugt 2 beträgt.

14. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Widerstandskoeffizienten

(W_1, W_2, \dots, W_n) wie folgt beschrieben werden:

$$W_i = \frac{p_{Ei} - p_{geo} - R \cdot Q_{Ei}^k}{Q_{Ei}^m}$$

wobei

W_i der Widerstandskoeffizient der i -ten Entnahmestelle (8) ist,
 p_{Ei} der bei geöffneter i -ten Entnahmestelle (8) ermittelte Druck ist,
 p_{geo} der Druck der geodätischen Höhe ist,
 R der zu bestimmende Systemwiderstand ist,
 Q_{Ei} der bei geöffneter i -ten Entnahmestelle (8) ermittelte Volumenstrom ist,
 k die Potenz des durchflussabhängigen Anteils der Systemkennlinie (5) ist und bevorzugt 1 oder 2 beträgt,
 m ein festlegbarer Exponent für den Druckverlust der Entnahmestellen (8) ist und bevorzugt 2 beträgt.

15. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Pumpenanlage (3) nach der Bestimmung der Systemkennlinie (5) entlang einer Regelkennlinie (16) geregelt wird, die der um einen gewünschten Fließdruck (p_{FL}) an den Entnahmestellen (8) entsprechenden Betrag angehobenen Systemkennlinie (5) entspricht.
16. Verfahren nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet, dass** der ermittelte Wert des Systemwiderstands (R) als eine zeitliche Funktion ($R(t)$) in einer Reglereinheit (4) hinterlegt ist, die eine zeitlich auftretende Widerstandserhöhung im Verteilernetz (2) beschreibt.
17. Verfahren nach Anspruch 15 oder 16, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Fließdruck (p_{FL}) als eine zeitliche Funktion ($p_{FL}(t)$) in der Reglereinheit (4) hinterlegt ist, die den gewünschten Fließdruck (p_{FL}) zeitabhängig, beispielsweise tageszeitabhängig, tagesabhängig oder saisonabhängig, definiert.
18. Verfahren zur Bestimmung des durch eine geodätische Höhe (H_{geo}) in einem flüssigkeitsführenden Verteilernetz (2) bedingten geodätischen Drucks (p_{geo}), insbesondere zur Bestimmung der Systemkennlinie (5) dieses Verteilernetzes (2) gemäß dem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 17, wobei das Verteilernetz (2) mehrere, insbesondere eine Vielzahl Entnahmestellen (8) aufweist, die von einer Pumpenanlage (3) mit wenigstens einer Pumpe (9) mit einem Förderdruck (p) versorgt werden, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Pumpenanlage (3) im geschlossenen Zustand aller Entnahmestellen (8) für eine bestimmte Zeitspanne (T_{akt}) betrieben wird, um einen bestimmten Druck (p) im Verteilernetz (2) aufzubauen, wobei nach Ablauf der Zeitspanne (T_{akt}) die am höchsten gelegene Entnahmestelle (8, E1) geöffnet wird, um den Druck (p) im Verteilernetz (2) abzubauen, und, sobald keine Flüssigkeit mehr aus der geöffneten Entnahmestelle (8, E1) austritt, der Druck (p) am Ausgang der Pumpenanlage (3) ermittelt wird, welcher dem geodätische Druck p_{geo} entspricht.

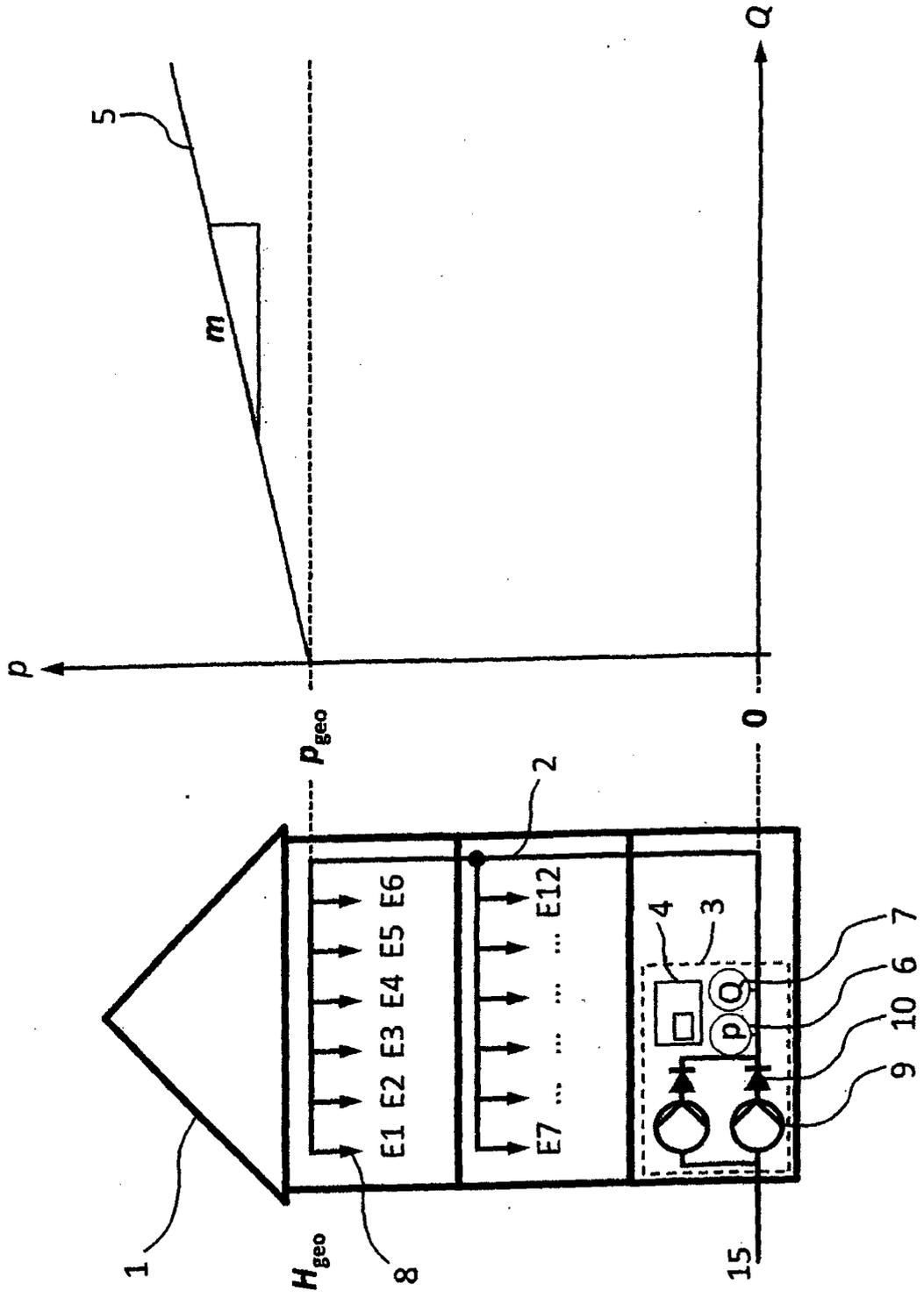


Fig. 1

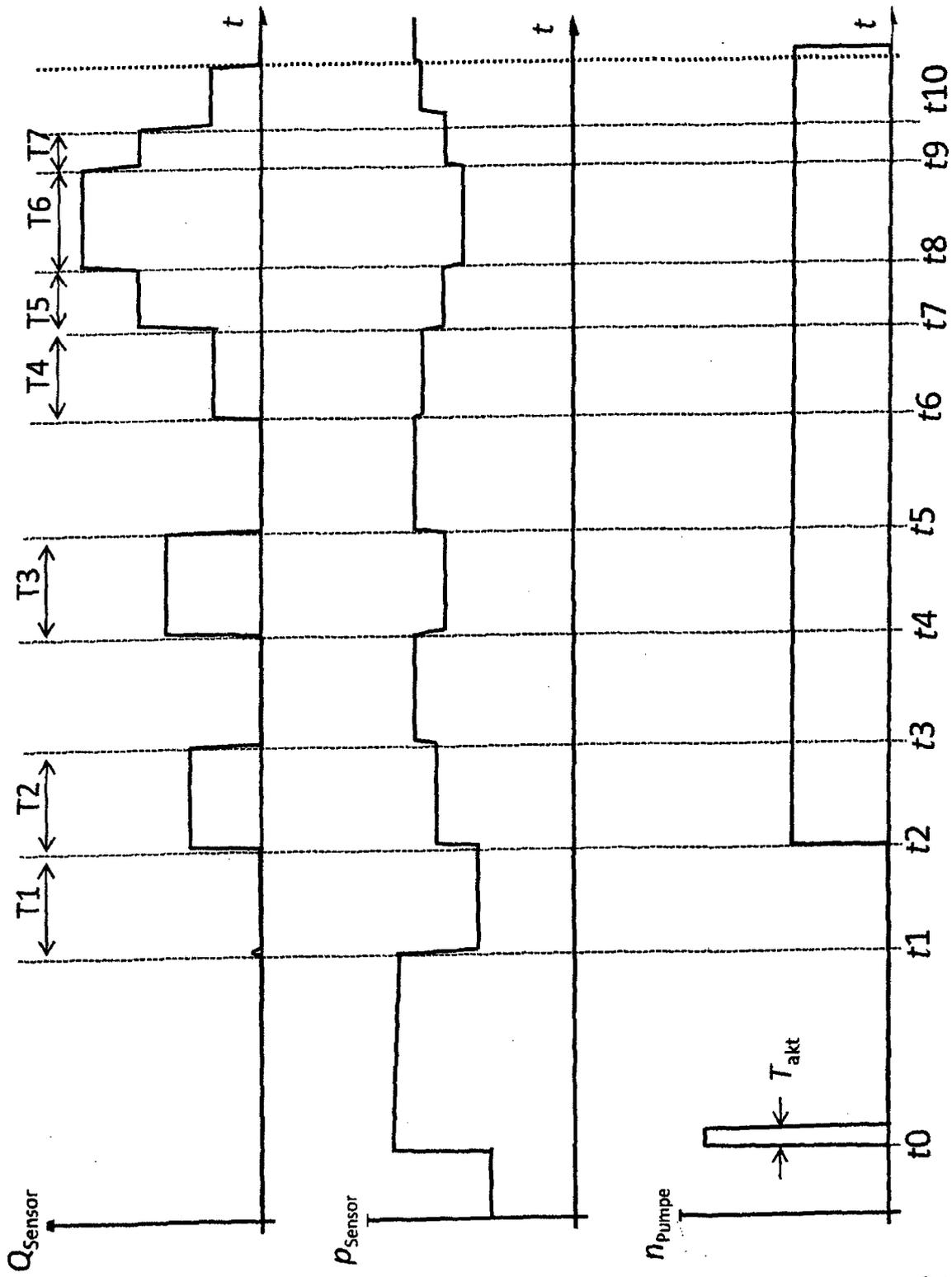


Fig. 2

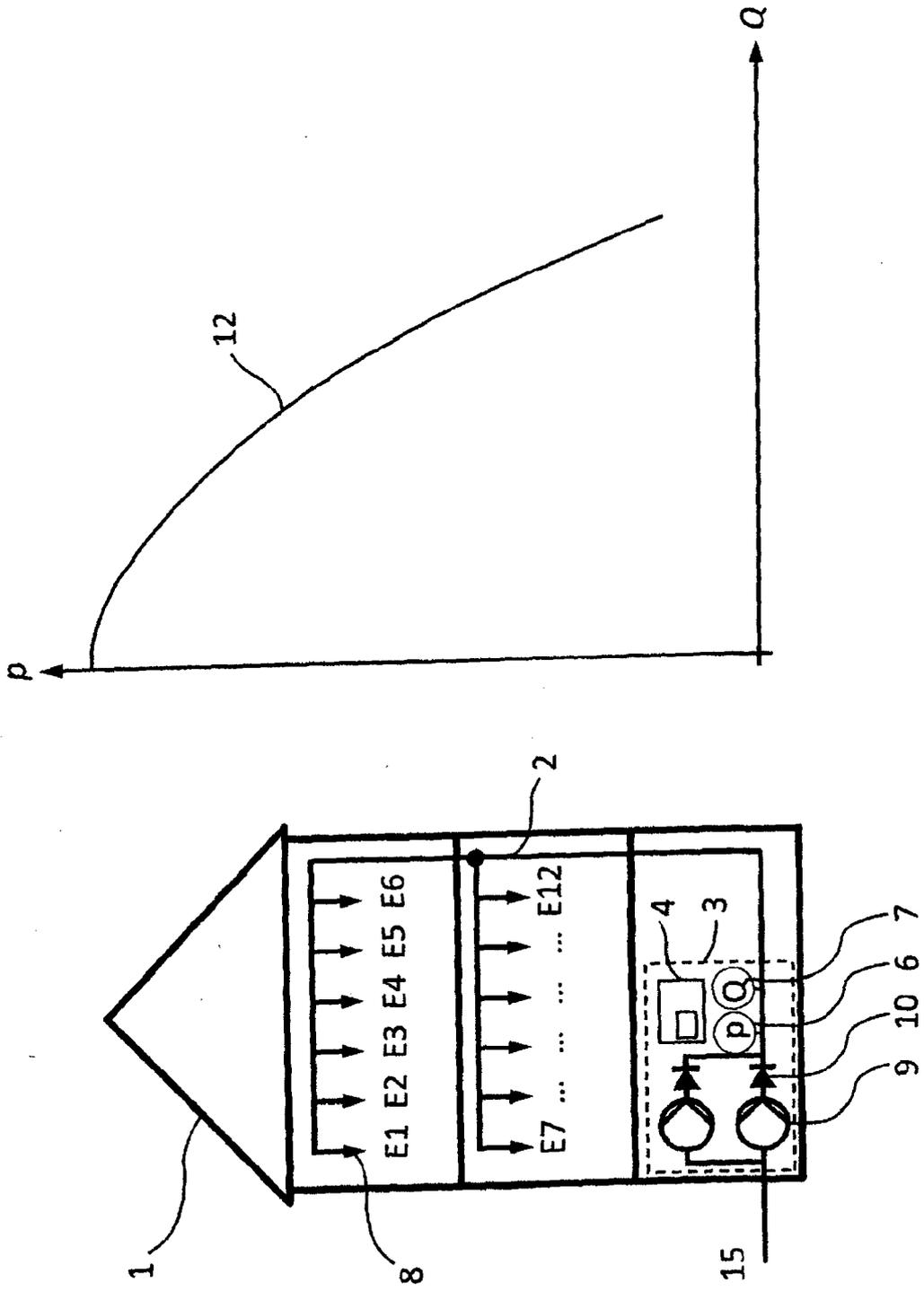


Fig. 3

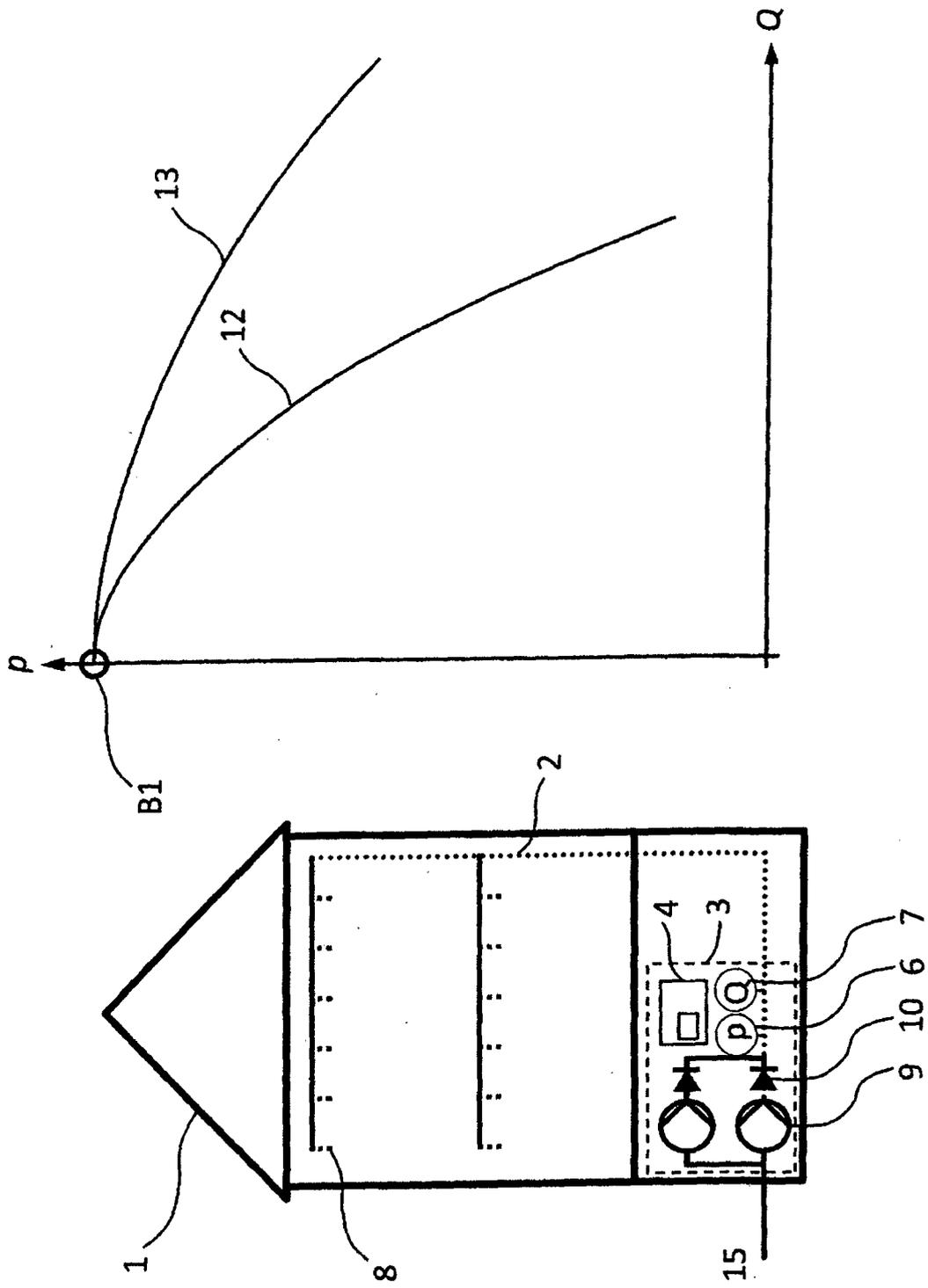


Fig. 4

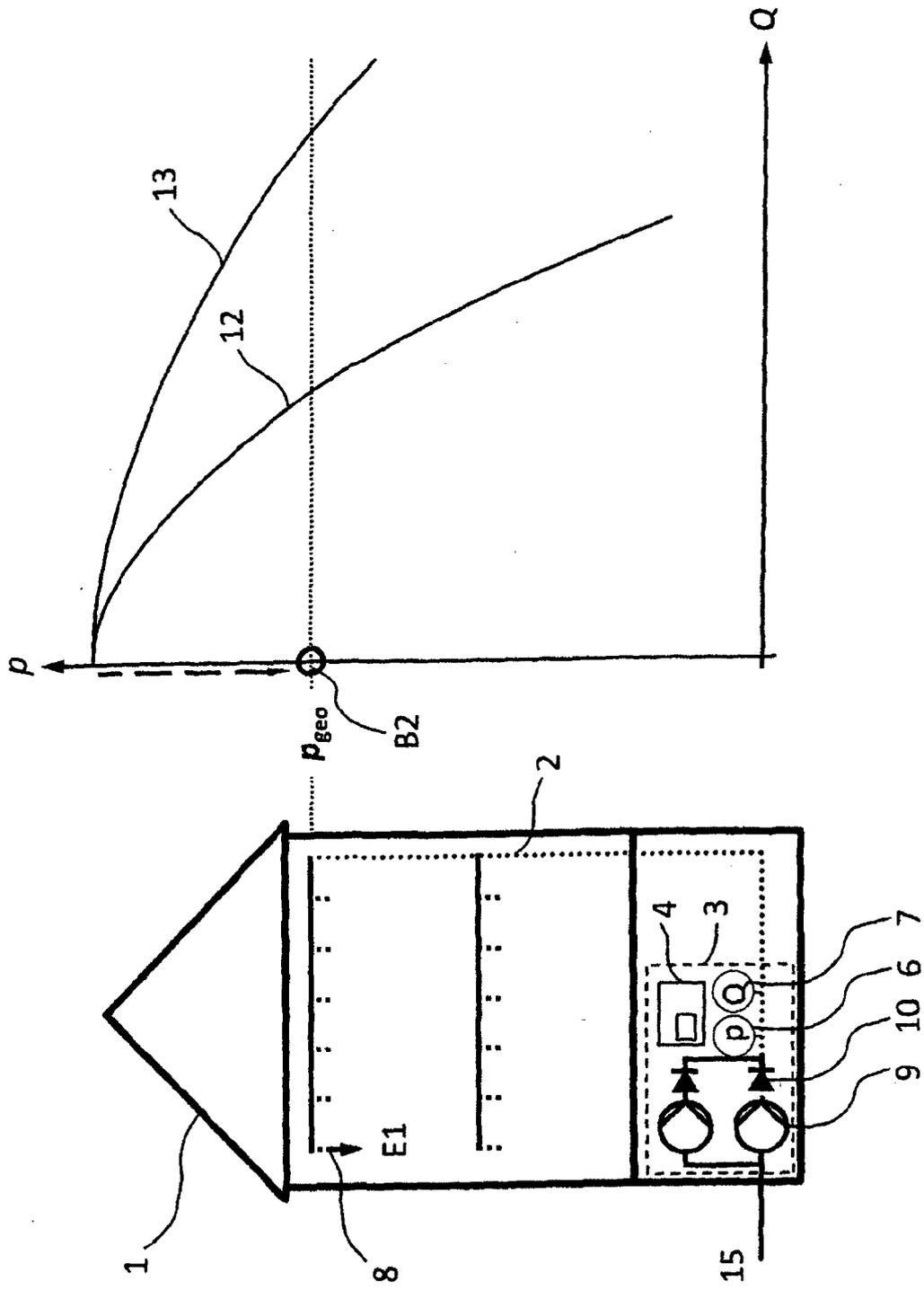


Fig. 5

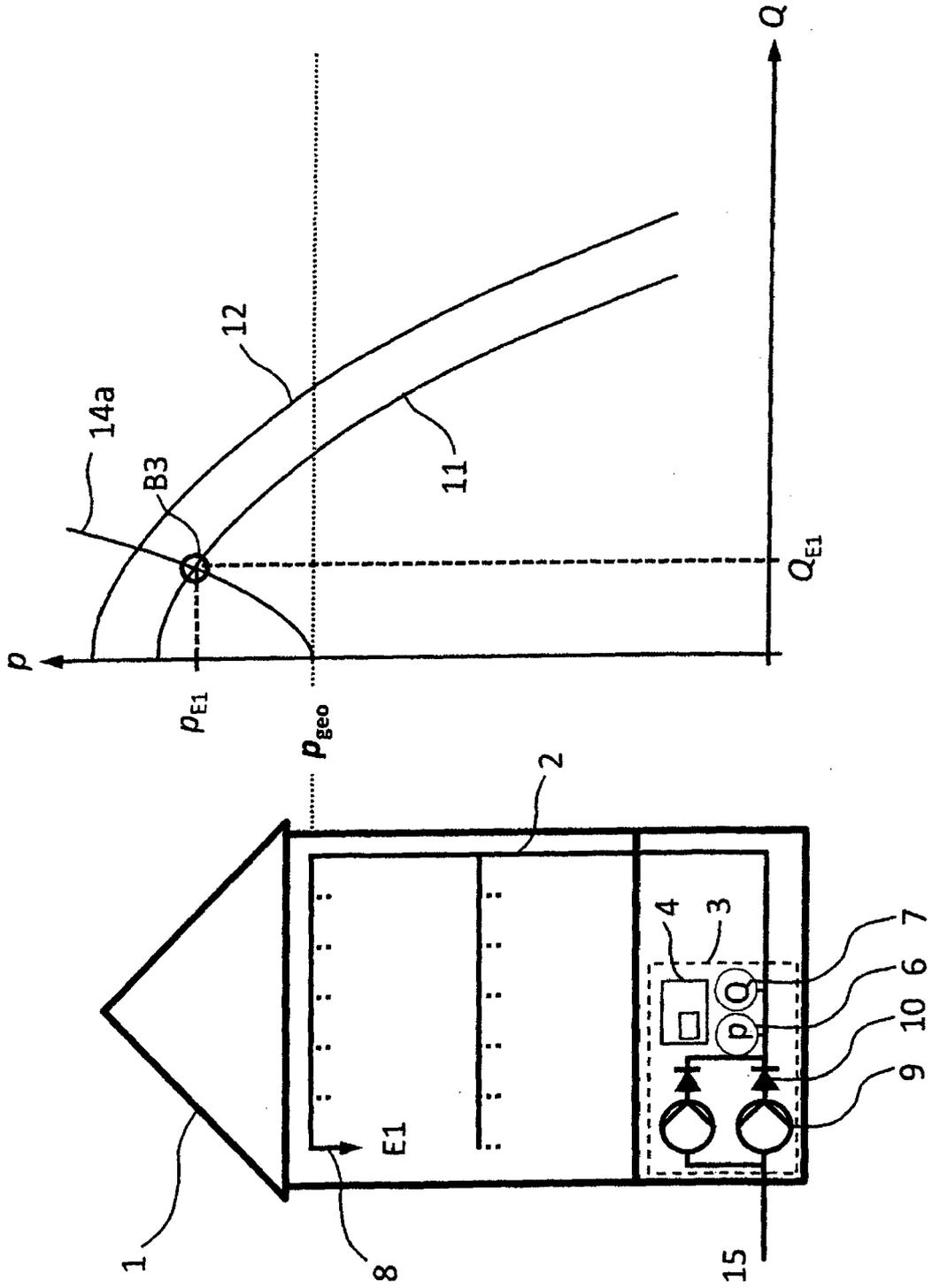


Fig. 6

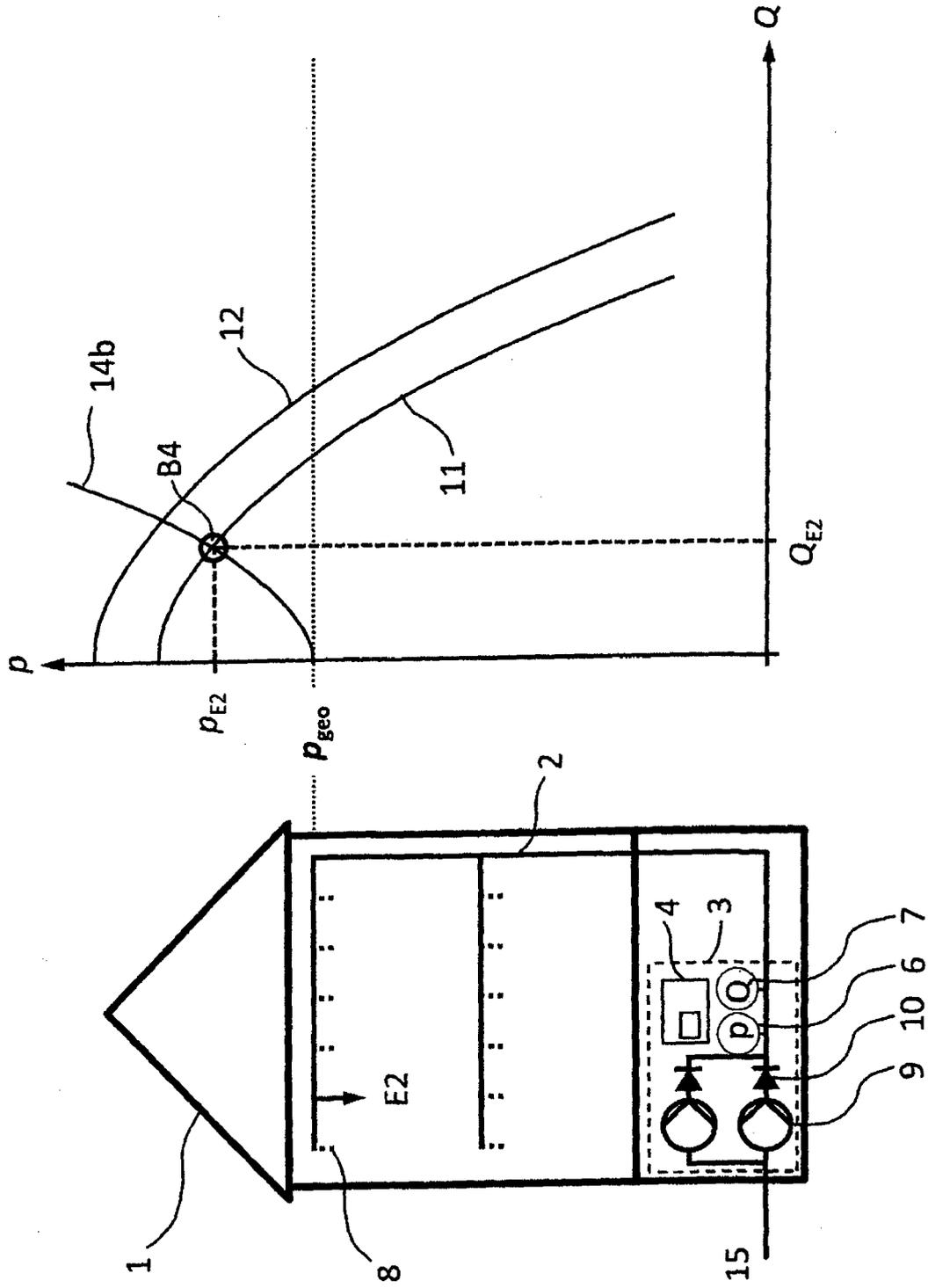


Fig. 7

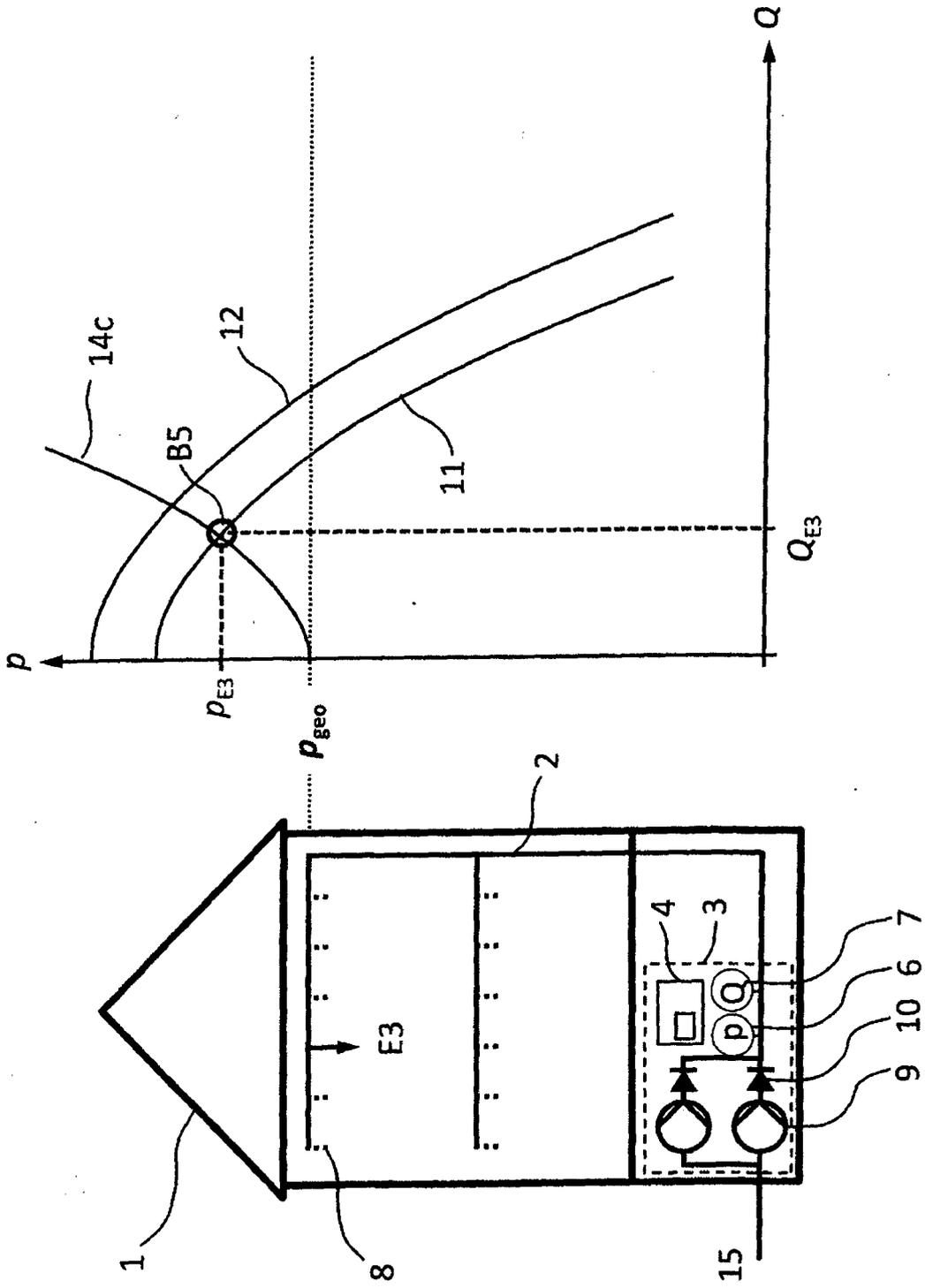


Fig. 8

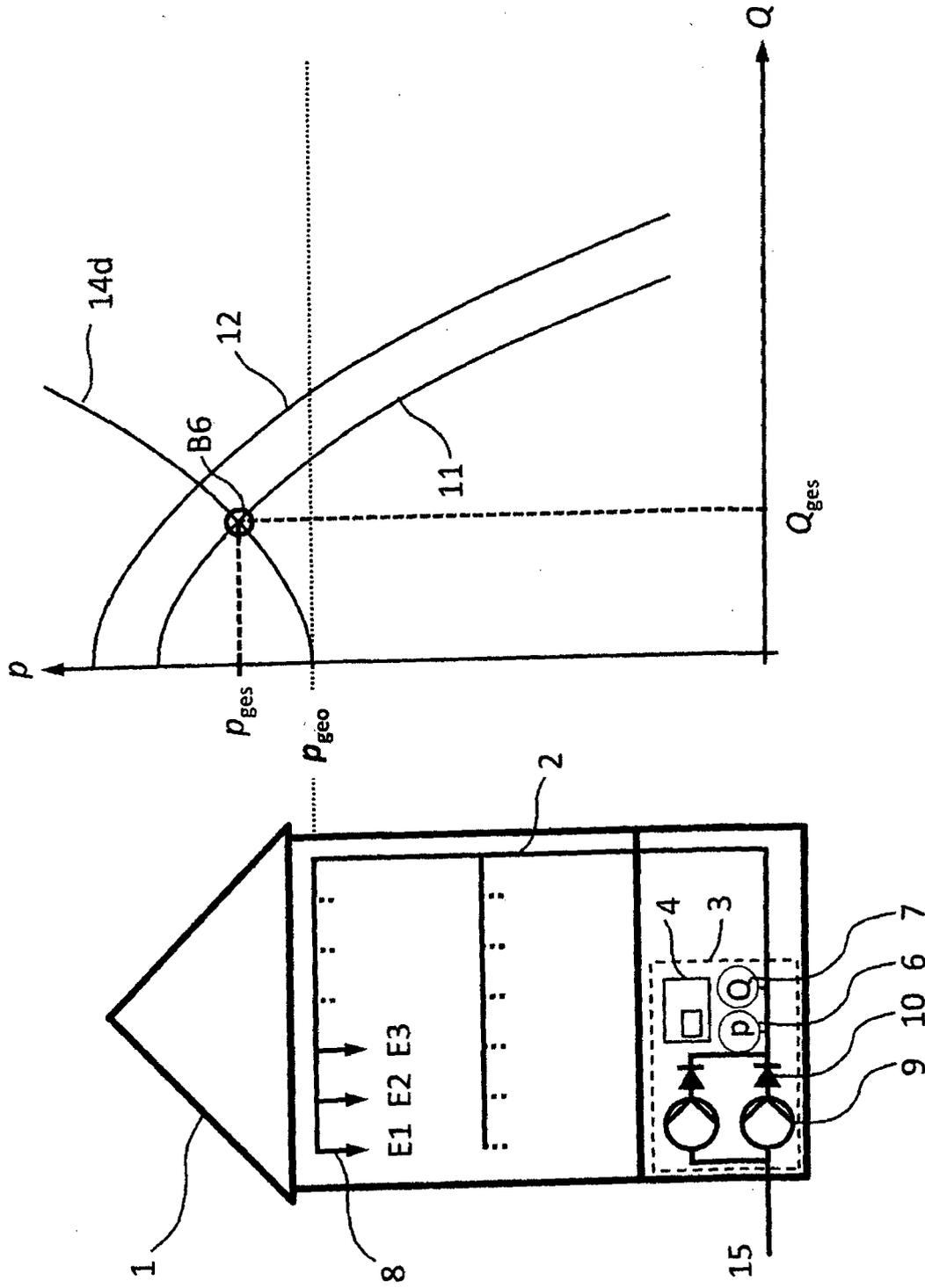


Fig. 9

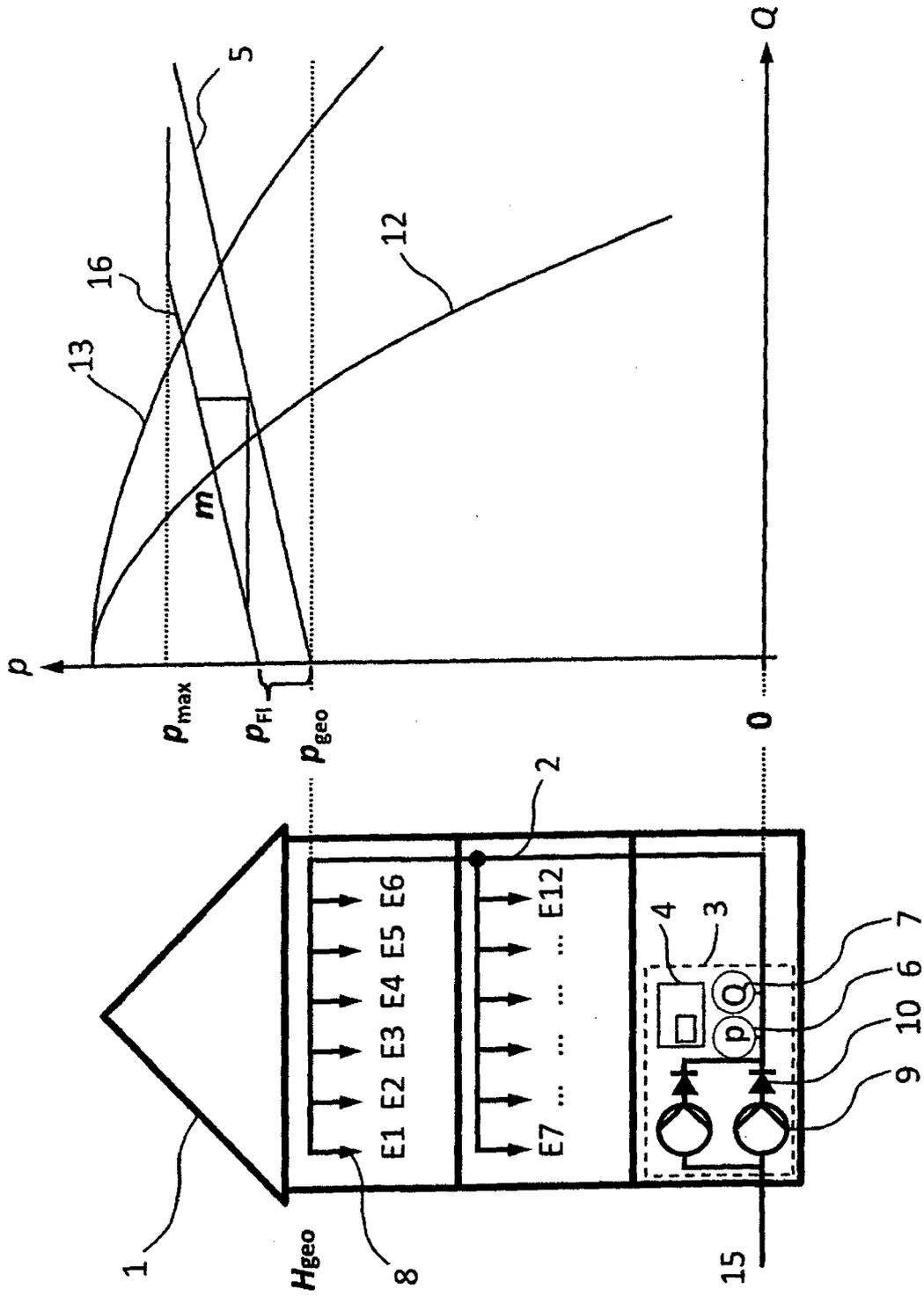


Fig. 10