

(19)



(11)

EP 2 944 821 A1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
18.11.2015 Patentblatt 2015/47

(51) Int Cl.:
F04D 15/00 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **15001441.3**

(22) Anmeldetag: **13.05.2015**

(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
Benannte Validierungsstaaten:
MA

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

(72) Erfinder: **Schwarz, Martin**
44267 Dortmund (DE)

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

(30) Priorität: **13.05.2014 DE 102014006828**

(54) **VERFAHREN ZUR ENERGIEOPTIMIERTEN DREHZAHLREGELUNG EINES PUMPENAGGREGATES**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum energieoptimalen Betrieb eines offenen Pumpensystems (1) zum Flüssigkeitstransport, mit zumindest einem drehzahlregelbaren Pumpenaggregat (2), das die Flüssigkeit aus einem Behälter (3) fördert. In Abhängigkeit zumindest einer herstellerseitig vorgegebenen Anlagenkennlinie ($H_A(Q, h)$) wird durch Auswertung einer mathematischen Funktion (Gl. 12a, 12b), die einem zu fördernden

Förderstrom (Q) den dafür benötigten volumenstromspezifischen Energieverbrauch ($P_Q(Q, h)$, $P_Q(n, h)$) des Pumpenaggregats (2) zuordnet, diejenige Drehzahl (n_{opt} , $n(Q_{opt}, h)$) berechnet, bei der der volumenstromspezifischen Energieverbrauch ($P_Q(Q_{opt}, h)$, $P_Q(n, h)$) minimal ist. Das Pumpenaggregat (2) wird dann mit dieser berechneten optimalen Drehzahl (n_{opt} , $n(Q_{opt}, h)$) betrieben.

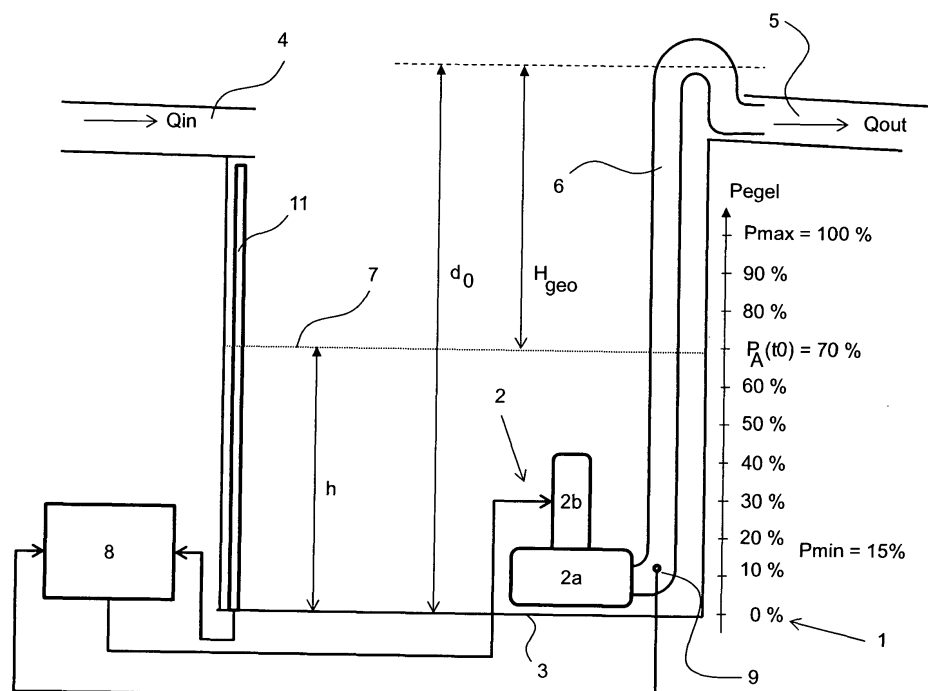


Fig. 1

EP 2 944 821 A1

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum energieoptimalen Betrieb eines offenen Pumpensystems zum Flüssigkeitstransport, mit zumindest einem drehzahlregelbaren Pumpenaggregat, das die Flüssigkeit aus einem Behälter fördert. Insbesondere betrifft die Erfindung ein Verfahren zum energieoptimalen Betrieb eines Abwasser aus einem Pumpensumpf einer Pumpstation fördernden, drehzahlregelbaren Pumpenaggregats.

[0002] Pumpensümpfe bilden Zwischensammler, in die das Abwasser über einen oder auch mehrere Zuläufe hineinfließt. Der Zulauf bzw. die Zuläufe sind Abwasserkanäle der Abwasserentsorgung. Je nach Größe dieses Pumpensumpfes fasst dieser eine oder mehrere Pumpen, die das Abwasser aus dem Pumpensumpf über eine Druckleitung in eine geodätisch höher gelegene Ablaufleitung pumpen. Diese Ablaufleitung kann ebenfalls ein Abwasserkanal des Kanalnetzes sein und beispielsweise in einen nächsten Zwischensammler oder zu einer Kläranlage führen.

[0003] Die Pumpenaggregate in derartigen Abwasserpumpstationen werden heutzutage überwiegend ungeregelt bzw. mittels Zweipunktregelung betrieben, bei der die Pumpe lediglich zyklisch oder nach Bedarf an und ausgeschaltet wird. Die Aktivierung und Deaktivierung erfolgt in Abhängigkeit des Pegelstandes im Pumpensumpf beispielsweise gesteuert über einen Schwimmer. Häufige Ein-Aus-Wechsel führen jedoch zu einem erhöhten Verschleiß der Pumpenaggregate und zu einem erhöhten Energieverbrauch.

[0004] Es sind jedoch auch Pumpstationen bekannt, deren Pumpenaggregate Frequenzumformer zur Drehzahlregelung besitzen, so dass die Pumpe bedarfsgerecht geregelt werden kann. Eine solche Abwasserpumpstation ist beispielsweise aus der deutschen Patentanmeldung DE 10 2013 007 026.0 bekannt.

[0005] Die WO 2005/088134 A1 beschreibt ein Verfahren zur Regelung einer Pumpstation, bei dem die Drehzahl der Pumpe im Hinblick auf die Füllstandshöhe im Pumpensumpf energetisch optimal gewählt wird. Dies gilt jedoch nur für den aktuellen Zeitpunkt. Im Hinblick auf einen zukünftigen Betriebsverlauf ist die in WO 2005/088134 A1 dargestellte Betriebsweise nicht energetisch optimal.

[0006] Im Hinblick auf den Energieverbrauch des Pumpenaggregates ist festzustellen, dass der Anteil der Energiekosten an den Lebenszykluskosten bei Abwasserpumpen sowohl bei niedriger als auch bei hoher Betriebszeit mit ca. 40% bis ca. 80% Energiekosten sehr hoch ist. Starke Beschleunigungsvorgänge oder der Betrieb der Pumpe bei hohen Drehzahlen während das zu fördernde Medium stark Stückgut behaftet ist, führen zur hohen Energieverbräuchen, die nicht unbedingt notwendig wären.

[0007] Die Herausforderung einer energieeffizienteren Regelung betrifft offene Pumpensysteme im Allgemeinen.

[0008] Es ist daher Aufgabe der Erfindung, ein Betriebsverfahren für ein offenes Pumpensystem respektive für ein eine Flüssigkeit aus einem Behälter fördernden Pumpenaggregat bereitzustellen, das einen im Vergleich zum Stand der Technik energieoptimierten Betrieb und damit eine Minimierung der Energiekosten ermöglicht. Es ist folglich Ziel der Erfindung, eine drehzahlregelbare Pumpe energieeffizient zu steuern. Dabei soll eine energieoptimale Drehzahl bestimmt und angewendet werden.

[0009] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen des Verfahrens sind in den Unteransprüchen wiedergegeben.

[0010] Erfindungsgemäß wird ein Verfahren zum energieoptimalen Betrieb eines offenen Pumpensystems zum Flüssigkeitstransport, mit zumindest einem drehzahlregelbaren Pumpenaggregat vorgeschlagen, das die Flüssigkeit aus einem Behälter fördert, wobei in Abhängigkeit zumindest einer herstellenseitig vorgegebenen Anlagenkennlinie durch Auswertung einer mathematischen Funktion, die einem zu fördernden Förderstrom den dafür benötigten volumenstromspezifischen Energieverbrauch des Pumpenaggregats zuordnet, diejenige Drehzahl berechnet wird, bei der der volumenstromspezifische Energieverbrauch minimal ist, und das Pumpenaggregat mit dieser berechnete Drehzahl als optimale Drehzahl betrieben wird.

[0011] Das Pumpenaggregat wird somit zumindest sofern keine außergewöhnliche Betriebssituation vorliegt, die eine andere Betriebseinstellung erforderlich macht, stets mit derjenigen Drehzahl betrieben, die zu einem minimalen Energieverbrauch führt.

[0012] Das Verfahren ist bei allen offenen Pumpensystemen anwendbar, d.h. solchen Pumpensystemen, die nicht in einem geschlossenen Kreis fördern. Insbesondere eignet sich das erfindungsgemäße Verfahren für den Betrieb eines Abwasser aus einem Pumpensumpf einer Pumpstation fördernden, drehzahlregelbaren Pumpenaggregats. Eine andere Anwendung ist beispielsweise der Betrieb einer Bohrlochpumpe, die Grundwasser aus einem Bohrloch fördert.

[0013] Es sei angemerkt, dass neben Wasser beliebige Flüssigkeiten gefördert werden können. Das Behältnis für die Flüssigkeit kann eine beliebige offene oder geschlossene, natürliche oder künstliche die Flüssigkeit haltende Stätte sein, insbesondere ein Pumpensumpf, ein Bohrloch, ein Brunnen, Becken, Tank, eine Zisterne, ein Reservoir, See, oder ein Sammler sein.

[0014] Das Verfahren wird nachfolgend anhand eines Ausführungsbeispiels unter Verwendung der beigegeführten Figuren beschrieben, das eine Abwasserpumpstation betrifft. Das konkrete Ausführungsbeispiel kann jedoch auf beliebige Pumpensysteme verallgemeinert werden. Es zeigen:

Figur 1: eine Pumpstation mit einem Pumpensumpf und darin angeordnetem Pumpenaggregat

Figur 2: Ablaufdiagramm des Verfahrens

Figur 3: Ablaufdiagramm des übergeordneten Verfahrens

Figur 4: Grafische Darstellung des spezifischen Energieverbrauchs

Figur 5: Darstellung des zeitlichen Verlaufs des gemessenen Förderstroms bei optimaler Drehzahl.

[0015] Für die Ausrüstung einer neuen oder bestehenden Pumpstation mit einer drehzahlregelbaren Abwasserpumpe ist das exakte Beziffern der Energieeinsparung gegenüber der Zweipunktsteuerung ohne Frequenzumrichter oder einen alternativen drehzahlregelbaren Pumpe von großer Bedeutung. Dies kann mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens erfolgen, zumal die Anlagenkennlinie aufgrund herstellerseitiger Vorgabe bekannt ist und nicht erst im Betrieb der Pumpstation ermittelt werden muss.

[0016] Figur 1 zeigt eine Abwasserpumpstation 1 umfassend einen Pumpensumpf 3 mit einem Zulauf 4 und einem Ablauf 5 und ein in diesem Pumpensumpf 3 angeordnetes Pumpenaggregat 2, das elektromotorisch angetrieben und in seiner Drehzahl regelbar ist. Wenngleich hier nur ein einziges Pumpenaggregat 2 dargestellt ist, können auch zwei oder mehr Pumpenaggregate im Pumpensumpf 3 vorhanden sein. Die Geometrie des Pumpensumpfes 3 wird als bekannt vorausgesetzt. Das Pumpenaggregat 2 besteht aus einer Pumpeneinheit 2a und einem diese antreibenden Elektromotor 2b. Es pumpt über eine Druckleitung 6 das im Pumpensumpf 3 befindliche Abwasser in den geodätisch höher liegenden Ablauf 5. Von dort fließt das Abwasser weiter zu einer nächsten Pumpstation, einen Vorfluter oder direkt zu einer Wasseraufbereitungsanlage.

[0017] In dem Zulauf 4 kann ein Volumenstromsensor angeordnet sein, der über einen fortschreitenden Zeitraum die über den Zulauf 4 in den Pumpensumpf 3 zufließende Wassermenge pro Zeiteinheit misst. Es ist jedoch auch möglich, die Zuflusswerte aus den Pegeländerungen und dem Förderstrom Q des Pumpenaggregats 2 zu berechnen. In diesem Fall wird der Volumenstromsensor nicht benötigt.

[0018] Dagegen ist ein Volumenstromsensor 9 druckseitig des Pumpenaggregats 2 vorhanden, um den Förderstrom Q des Pumpenaggregats 2 zu messen. Der Volumenstromsensor 9 kann alternativ auch an einer anderen Stelle, insbesondere in der Druckleitung 6 oder dem Ablauf 5 angeordnet sein. Ferner ist es auch möglich, die Förderstromwerte zu berechnen. In diesem Fall wird der Volumenstromsensor 9 ebenfalls nicht benötigt.

[0019] Des Weiteren befindet sich im Pumpensumpf 3 ein Füllstandssensor 11, der den Pegelstand h misst. Ein aktueller Pegelstand h wird durch die Linie 7 dargestellt. Für die Bestimmung einer betriebsoptimalen Drehzahl ist es jedoch nicht zwingend erforderlich, den aktuellen Pegelstand zu ermitteln. Vielmehr kann für die Berechnung auch mit einem konstanten Pegelstand gearbeitet werden, da die Berücksichtigung des aktuellen Pegelstands den energieoptimalen Betrieb nur geringfügig verbessert.

[0020] Die Drehzahlregelung des Pumpenaggregats 2 wird von einer Pumpenelektronik in Gestalt einer Auswerte- und Regelungseinheit 8 durchgeführt, die über eine Steuerungsleitung mit dem Pumpenaggregat 2, insbesondere dessen Elektromotor 2b verbunden ist und wie hier vorzugsweise auch über entsprechende Messleitungen mit dem Volumenstromsensor 9 und/ oder dem Füllstandssensor 11 verbunden sein kann. Es sei angemerkt, dass die Pumpenelektronik 8 entgegen der Darstellung in Figur 1 auch durch eine Auswerteeinheit einerseits und eine baulich davon getrennte Regelungseinheit andererseits gebildet sein kann. Diese Einheiten können zudem auch örtlich voneinander getrennt sein.

[0021] Die Pumpenelektronik 8 weist eine Rechelektronik auf, um numerische Berechnungen durchzuführen, und vorzugsweise auch eine Messelektronik auf, um Messwerte zu verarbeiten. Die Drehzahlregelung des Pumpenaggregats 2 erfolgt in an sich bekannter Weise durch die Ansteuerung eines Frequenzumrichters, der den Elektromotor 2b mit einer zur Erreichung einer Solldrehzahl erforderlichen Spannung geeigneter Höhe und Frequenz beaufschlagt. Der Frequenzumrichter kann direkt baulich am Elektromotor 2b angeordnet oder ebenfalls Teil der entfernten Auswerte- und Regelungseinheit 8, oder eine weitere separate Leistungselektronik außerhalb des Pumpensumpfs 3 sein.

[0022] Das erfindungsgemäße Verfahren geht von dem Grundgedanken aus, dass ein Pumpenaggregat eine Energie ΔE benötigt, um ein bestimmtes Volumen ΔV aus dem Pumpensumpf 3 heraus zu fördern. Aus dieser Erkenntnis kann ein volumenstromspezifischer Energieverbrauch $P_Q(Q)$ bestimmt werden, der das Verhältnis der aufgenommenen Leistung $P(Q)$ zum Förderstrom Q beschreibt. Der volumenstromspezifische Energieverbrauch ist ein Maß zur Bewertung der Energieeffizienz und zur größtmöglichen Ausschöpfung des Energieeinsparpotentials. Er bezeichnet gerade die Leistungsaufnahme je gefördertem Kubikmeter Abwasser:

$$\frac{\Delta E}{\Delta V} = \frac{\Delta E/t}{\Delta V/t} = \frac{P(Q)}{Q} = P_Q(Q) \quad \text{Gl. 1}$$

[0023] Dieser volumenstromspezifische Energieverbrauch $P_Q(Q)$ fällt mit zunehmendem Förderstrom Q ab und steigt dann zu höheren Förderströmen Q wieder an, so dass er im Bereich mittleren Förderstroms Q ein Minimum besitzt. Ein

Betrieb in diesem Bereich ist für das Pumpenaggregat 2 energetisch am effizientesten. Das Verfahren sieht nun vor, das Pumpenaggregat gerade so einzustellen, dass dieses energetische Minimum erreicht wird. Nachfolgend werden zwei Varianten beschrieben, dieses Minimum zu ermitteln.

[0024] Der prinzipielle Ablauf des Verfahrens nach einer ersten Variante ist in Figur 2 veranschaulicht und wird nachfolgend erläutert. Bei dieser ersten Variante wird zunächst der optimale Förderstrom Q_{opt} berechnet und dann diejenige Drehzahl $n(Q_{opt}, h)$ berechnet, die erforderlich ist, damit das Pumpenaggregat 2 gerade den optimalen Förderstrom Q_{opt} fördert. Mittels der zweiten Variante kann die optimale Drehzahl direkt, d.h. in einem Schritt, berechnet werden. Figur 3 zeigt einen globalen Verfahrensablauf für beide Varianten, der nachfolgend noch näher beschrieben wird.

[0025] Das Verfahren nach Figur 2 beginnt mit einer Messung des Pegelstands h in Schritt 20. Es sei jedoch angemerkt, dass die Messung des zeitveränderlichen, aktuellen Pegelstands $h(t)$ nicht unbedingt erforderlich ist. Gemäß einer alternativen Ausführungsvariante kann die Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$ für die Berechnung der optimalen Drehzahl n_{opt} einen konstanten Pegelstand h des Behältnisses 3 berücksichtigen, beispielsweise einen mittleren Pegelstand h oder einen oberen Pegelgrenzwert h_o . In diesem alternativen Fall ist in Schritt 20 der konstante Pegelstand $h = h_o$ oder $h = h_o$ zu setzen. Nachfolgend wird der Pegelstand in den Gleichungen mit h angegeben, wobei hierunter entweder der zeitvariable aktuelle Pegelstand $h(t)$ oder einer der oben genannten konstanten Pegelstände h, h_o zu verstehen ist.

[0026] Für die konkrete Kombination aus Anlage 1 (Pumpensumpf 3 samt Druckleitung 6 und Kanäle 4, 5 und Pumpenaggregat 2), wird dann zunächst derjenige Förderstrom Q_{opt} gesucht, bei dem die spezifische Energie $P_Q(Q)$ minimal ist, Schritt 22. Die Kombination aus Anlage und Pumpenaggregat 2 wird durch die Blöcke 30, 32, 34 und 36 ausgedrückt, welche den mathematischen Zusammenhang bereitstellen, um die volumenstromspezifische Energie $P_Q(Q)$ für einen bestimmten Förderstrom zu ermitteln.

[0027] Die Suche nach dem Minimum der volumenstromspezifischen Energie $P_Q(Q)$ kann durch ein beliebiges mathematisches Verfahren nach dem Stand der Technik erfolgen. Im einfachsten Fall wird Q variiert, d.h. die spezifische Energie $P_Q(Q)$ für eine Vielzahl verschiedener Förderströme Q_i zwischen einem minimalen und einem maximalen Förderstrom jeweils berechnet und anschließend aus den erhaltenen Ergebnissen das Minimum $P_{Q,min}$ gesucht, wobei dann derjenige Förderstrom, der gerade zu diesem Minimum geführt hat, der gesuchte optimale Förderstrom Q_{opt} ist.

[0028] Zu diesem optimalen Förderstrom Q_{opt} wird dann diejenige Drehzahl $n(Q_{opt}, h)$ berechnet, die erforderlich ist, damit das Pumpenaggregat 2 gerade den optimalen Förderstrom fördert, Schritt 24. Diese optimale Drehzahl $n(Q_{opt}, h)$ wird dann am Pumpenaggregat 2 eingestellt, Schritt 26, bzw. wird das Pumpenaggregat 2 -soweit möglich- auf dieser energieeffizienten Drehzahl $n(Q_{opt}, h)$ betrieben.

[0029] Zusätzlich können Ausnahmebedingungen in Schritt 28 geprüft werden, welche zu dem Ergebnis führen können, dass für den aktuellen Anlagenzustand eine andere Drehzahl als die berechnete optimale Drehzahl $n(Q_{opt}, h)$ sinnvoll ist. So ist beispielsweise ein Ausnahmezustand, dass der Zulauf den Förderstrom übersteigt oder ein bestimmter Maximalpegel oder oberer Pegelgrenzwert h_o im Pumpensumpf 3 erreicht wird. Dies kann dann ein Auslöser dafür sein, dass anstelle der optimalen Drehzahl $n(Q_{opt}, h)$ die Maximaldrehzahl des Pumpenaggregats 2 eingestellt wird, um ein Überlaufen zu verhindern. Im Rahmen der "Prüfung von Ausnahmebedingungen" in Schritt 28 werden folglich eine oder mehrere Bedingungen geprüft, um bestimmte Situationen und/ oder Betriebszustände zu erkennen, die gegebenenfalls eine von der optimalen Drehzahl $n(Q_{opt}, h)$ abweichende Drehzahl erforderlich machen. Diese Prüfung ist jedoch zur Ausführung der Erfindung nicht erforderlich.

[0030] Wie bereits im Hinblick auf die Blöcke 30, 32, 34 und 36 angemerkt, werden zur Bestimmung der volumenstromspezifischen Energieverbrauchs $P_Q(Q)$ das Pumpenkennfeld $H_P(Q, n)$ und das Leistungsaufnahmekennfeld $P(Q, n)$ des zu untersuchenden Pumpenaggregats 2 sowie zumindest eine Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$, letztere auch Rohrnetzkenlinie genannt, benötigt.

[0031] Das Pumpenkennfeld $H_P(Q, n)$ beschreibt den Zusammenhang zwischen dem vom Pumpenaggregat 2 geförderten Förderstrom Q bei einer bestimmten Druckdifferenz Δp zwischen der Saugseite und der Druckseite der Pumpe 2a, die in einer entsprechenden Förderhöhe H zum Ausdruck kommt, bei einer bestimmten Drehzahl n . Für jede bestimmte Drehzahl n gibt es eine Pumpenkennlinie $H_{P,n}(Q)$, so dass das Pumpenkennfeld $H_P(Q, n)$ auch als eine Vielzahl einzelner Pumpenkennlinien $H_{P,n}(Q)$ betrachtet werden kann. Die grafische Darstellung dieses Zusammenhangs erfolgt zumeist im sogenannten HQ-Diagramm. Für jede Drehzahl n besitzt das Pumpenaggregat 2 folglich eine bestimmte Pumpenkennlinie $H_{P,n}(Q)$, die für die Nenndrehzahl n_0 beispielsweise mittels eines Polynoms 2. Grades

$$H_{P,n_0}(Q) = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2 \quad \text{Gl. 2}$$

beschrieben werden kann, das aufgrund der konstanten Drehzahl $n = n_0$ keine Abhängigkeit von n besitzt. Die Koeffizienten a_0, a_1 und a_2 sind Konstanten.

[0032] In entsprechender Weise kann auch das Leistungsaufnahmekennfeld $P(Q, n)$ aufgestellt werden, das aus einer Vielzahl Leistungskennlinien $P_n(Q)$ bestehend betrachtet werden kann, die jeweils für eine bestimmte Drehzahl n den

Zusammenhang zwischen dem Förderstrom Q und der Leistungsaufnahme P beschreiben. Für die Nenndrehzahl n_0 kann die Leistungskennlinie $P_{n_0}(Q)$ beispielsweise mittels eines Polynoms 3. Grades

$$P_{n_0}(Q) = b_0 + b_1 Q + b_2 Q^2 + b_3 Q^3 \quad \text{Gl. 3}$$

beschrieben werden kann, das aufgrund der konstanten Drehzahl $n = n_0$ keine Abhängigkeit von n besitzt. Die Koeffizienten b_0 , b_1 , b_2 und b_3 sind ebenfalls Konstanten.

[0033] Das Pumpenkennfeld $H_P(Q, n)$ und das Leistungskennfeld $P(Q, n)$ werden vom Pumpenhersteller für eine Vielzahl verschiedener Drehzahlen, insbesondere für Nenndrehzahl n_0 vermessen und als Messwerte oder in Kurvendiagrammdarstellungen bereitgestellt. Gegebenenfalls werden die Pumpen- und Leistungskennlinien auch direkt vom Pumpenhersteller in mathematischer Darstellung in der Art einer Funktion nach Gleichung 2 oder 3 angegeben. Sofern dies nicht erfolgt, können aus den angegebenen Messwerten oder Kurvendarstellungen durch Interpolation oder Approximation nach einer im Stand der Technik an sich bekannten Art und Weise Polynome nach Gleichungen 2 oder 3 mit den entsprechenden Koeffizienten zur Beschreibung der Pumpenkennlinie oder -kennlinien bzw. Leistungskennlinie oder -kennlinien gefunden werden.

[0034] Dasselbe gilt letztendlich auch für das Anlagenkennfeld $H_A(Q, h)$, das den hydraulischen Zusammenhang zwischen Volumenstrom Q und Förderhöhe H des Pumpsystems 1 beschreibt. Das Anlagenkennfeld $H_A(Q, h)$ ist seitens des Betreibers der Pumpstation aufgrund der vorgesehenen Dimensionierung von Zu- und Ablauf 4, 5 sowie der Druckleitung 6 bekannt; letztendlich schon deshalb, um den Pumpenhersteller in die Lage zu versetzen, ein geeignetes Pumpenaggregat auswählen und anbieten zu können. Das Anlagenkennfeld $H_A(Q, h)$ ist in der Regel eine Parabel mit einer durch den Rohrleitungswiderstand definierten Steigung, die um die geodätische Höhe H_{geo} angehoben ist, wie Gleichungen 4 und 5 beispielhaft beschreiben:

$$H_A(Q) = H_{geo} + d_1 Q + d_2 Q^2 \quad \text{Gl. 4}$$

$$H_A(Q, h) = d_0 - h + d_1 Q + d_2 Q^2 \quad \text{Gl. 5}$$

wobei die Koeffizienten d_0 , d_1 und d_2 Konstanten sind und h der Pegelstand (Wasserstand) im Pumpensumpf 3 ist. Das Anlagenkennfeld $H_A(Q, h)$ gemäß Gl. 5 reduziert sich im Falle der Verwendung eines konstanten Pegelstands, z.B. $h = h_0$ oder $h = h$, auf eine Anlagenkennlinie $H_A(Q)$ gemäß Gl. 4. Um alle Verfahrensvarianten zu umfassen, wird nachfolgend jedoch stets von einer Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$, obgleich es sich im Falle der Berücksichtigung des veränderlichen aktuellen Pegelstands $h(t)$ eigentlich um ein Kennfeld handelt. d_0 ist der Abstand zwischen dem höchsten Punkt in der angeschlossenen Druckrohrleitung 6 und dem Pumpensumpfboden, sodass sich die geodätische Höhe H_{geo} durch $d_0 - h$ gegeben ist.

[0035] Für die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird vorausgesetzt, dass zumindest eine Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$ bekannt ist, d.h. herstellerseitig vorgegeben ist. Dies ist sinnvollerweise im Falle der Verwendung eines konstanten Pegelstands diejenige Anlagenkennlinie für diesen konstanten Pegelstand. Es ist somit im Betrieb des Pumpenaggregats keine Systemidentifikation erforderlich, d.h. keine Ermittlung der Anlagenkennlinie. Vielmehr ist dadurch die Möglichkeit gegeben, bereits vor der Inbetriebnahme des Pumpsystems 1, insbesondere in der Projektierungsphase, einem Kunden zu prognostizieren, wie hoch die Energieeinsparung durch den Betrieb bei der optimalen Drehzahl ist.

[0036] Vorzugsweise sind auch das Pumpenkennfeld $H_P(Q, n)$ und das Leistungsaufnahmekennfeld $P(Q, n)$ herstellerseitig vorgegeben, so dass auch hier keine messtechnischen Ermittlungen im Betrieb des Pumpenaggregats erforderlich sind.

[0037] Für die Aufstellung der mathematischen Funktion, die einem zu fördernden Förderstrom Q den dafür benötigten spezifischen Energieverbrauch $P_Q(Q, h)$ unter Berücksichtigung der Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$ zuordnet, werden die Pumpenkennlinien und Leistungsaufnahmekennlinien nicht nur für bestimmte diskrete Drehzahlen sondern für alle Drehzahlen benötigt. Selbiges ist erforderlich, um zu ermitteln, welche Drehzahl n das Pumpenaggregat 2 benötigt, um einen bestimmten Förderstrom Q zu fördern. Das heißt, es muss das gesamte Pumpenkennfeld und Leistungsaufnahmekennfeld des Pumpenaggregats bekannt sein. Wie bereits ausgeführt, kann eine vollständige Vermessung und Angabe des jeweiligen Kennfelds als Messwerte oder als Polynome durch den Pumpenhersteller erfolgen.

[0038] Das Pumpenkennfeld $H_P(Q, n)$ und Leistungsaufnahmekennfeld $P(Q, n)$ können alternativ beispielsweise da-

durch mathematisch beschrieben werden, dass nur die Pumpenkennlinie $H_{P,n_0}(Q)$ für die Nenndrehzahl n_0 und nur die Leistungsaufnahmekennlinie $P_{n_0}(Q)$ für Nenndrehzahl n_0 zu Grunde gelegt und jeweils die Affinitätsgesetze ($H \sim n^2$; $P \sim n^3$) angewendet werden. Auf diese Weise kann für eine beliebige Drehzahl n die entsprechende Pumpenkennlinie $H_{P,n}(Q, n)$ anhand von Gleichung 6 sowie die Leistungsaufnahmekennlinie $P_n(Q, n)$ anhand von Gleichung 7 angegeben werden,

$$H_{P,n}(Q, n) = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 H_{P,n_0}\left(\frac{n_0}{n} Q\right) \quad \text{Gl. 6}$$

$$P_n(Q, n) = \frac{\left(\frac{n}{n_0}\right)^3 P_{n_0}\left(\frac{n_0}{n} Q\right)}{\eta_{ges}(n)} \quad \text{Gl. 7}$$

wobei η_{ges} einen Gesamtwirkungsgrad beschreibt, der sich aus dem Produkt mehrerer Wirkungsgrade, insbesondere dem Wirkungsgrad des Frequenzumrichters, des Elektromotors 2a und einer etwaigen Kupplung gebildet ist.

[0039] Die Verwendung der Affinitätsgesetze hat somit den Vorteil, dass lediglich eine Pumpenkennlinie $H_{P,n_0}(Q)$ und eine Leistungsaufnahmekennlinie $P_{n_0}(Q)$, nämlich vorzugsweise jeweils bei Nenndrehzahl n_0 bekannt sein braucht, um das gesamte Pumpenkennfeld $H_P(Q, n)$ bzw. Leistungsaufnahmekennfeld $P(Q, n)$ zu beschreiben. Zur Berücksichtigung eines reduzierten Wirkungsgrades bei abnehmender Drehzahl n kann das den Gesamtwirkungsgrad η_{ges} bildende Produkt z.B. eine Funktion $f_\eta(n)$ der Gestalt

$$f_\eta(n) = -c \left(\left(\frac{n}{n_0}\right)^2 - \frac{2n}{n_0} + 1 \right) + 1. \quad \text{Gl. 8}$$

enthalten, wobei der Parameter c eine nicht negative Konstante ist. Dabei bedeutet ein Parameter $c = 0$, dass der Wirkungsgrad trotz abnehmender Drehzahl n konstant bleibt. Liegen Messwerte für verschiedene Drehzahlen vor, so kann der Parameter c so bestimmt werden, dass das resultierende Kennfeld optimal zu den Messdaten passt. Alternativ können sämtliche Messpunkte interpoliert und so ein Leistungsaufnahmekennfeld generiert werden.

[0040] Für die erfindungsgemäße Drehzahlregelung ist zu beachten, dass zwar theoretisch bei jedem beliebigen Wasserstand im Pumpensumpf 3 jeder Punkt auf der Anlagenkennlinie realisiert werden kann, jedoch muss in der Praxis von Pumpenaggregaten in Abwasserpumpstationen berücksichtigt werden, dass die Drehzahl lediglich in gewissen Grenzen geregelt werden sollte, d.h. zwischen einem minimalen Drehzahlwert n_{min} und einem maximalen Drehzahlwert n_{max} . Der maximale Drehzahlwert n_{max} kann beispielsweise mit der Nenndrehzahl n_0 gleichgesetzt werden. Der minimale Drehzahlwert n_{min} kann beispielsweise die halbe Nenndrehzahl n_0 betragen.

[0041] Wird das Pumpenkennfeld $H_P(Q, n)$ gemäß Gleichung 6 gewählt und die Pumpenkennlinie $H_{P,n_0}(Q)$ bei Nenndrehzahl n_0 durch ein quadratisches Polynom gemäß Gleichung 2 approximiert, kann für jeden Förderstrom Q und einem Pegelstand h ($= h(t)$ oder h oder h_0) im Pumpensumpf 3 die einzustellende Drehzahl n aus der Erkenntnis berechnet werden, dass sich nur Betriebspunkte entlang der Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$ einstellen können. Dies bedeutet, dass für diese Betriebspunkte die eine beliebige Pumpenkennlinie $H_{P,n}(Q, n)$ im Kennfeld beschreibende Gleichung 6 dieselben HQ-Werte ergibt, wie die Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$, so dass die Gleichungen 5 und 6 gleichgesetzt und daraus die zur Förderung eines bestimmten Förderstroms Q einzustellende erforderliche Drehzahl n ermittelt werden kann. Denn die gesuchte Drehzahl n ergibt sich gerade als Lösung der Gleichung $H_{P,n}(Q, n) = H_A(Q, h)$. Es ergibt sich dann die folgende Funktion:

$$n(Q, h) := \frac{n_0}{2a_0} \left(-a_1 Q + \sqrt{4a_0(d_0 - h + d_1 Q + (d_2 - a_2)Q^2) + a_1^2 Q^2} \right). \quad \text{Gl. 9a}$$

[0042] Die Leistungsaufnahme $P(Q, n)$ für einen beliebigen Förderstrom Q und eine bestimmte Drehzahl n , berechnet sich nach Gleichung 7. In dieser Gleichung 7 kann die allgemeine Drehzahl n durch diejenige Drehzahl $n(Q, h)$ ersetzt werden, die gerade erforderlich ist, um bei einer bestimmten Füllstandshöhe h einen bestimmten Förderstrom Q zu erreichen. D.h. Drehzahl n kann durch den rechten Teil von Gleichung 9 ersetzt werden:

$$P_n(Q, n(Q, h)) = \frac{\left(\frac{n(Q, h)}{n_0} \right)^3 P_{n_0} \left(\frac{n_0}{n(Q, h)} Q \right)}{\eta_{ges}(n)} \quad \text{Gl. 10a}$$

[0043] Man erhält damit einen mathematischen Ausdruck zur Bestimmung der Leistungsaufnahme P , der nicht mehr abhängig von der Drehzahl n , sondern nur noch abhängig vom Pegelstand h und dem Förderstrom Q ist. Somit kann nach Gleichung 11a die Leistungsaufnahme $\tilde{P}(Q, h)$ für jeden Pegel h berechnet werden, wobei gleichzeitig sichergestellt wird, dass der Förderstrom Q auf der Anlagenkennlinie $H_A(Q)$ liegt:

$$\tilde{P}(Q, h) := P_n(Q, n(Q, h)) \quad \text{Gl. 11a}$$

[0044] Der volumenstromspezifische Energieverbrauch $P_Q(Q, h)$ ergibt sich dann dadurch, dass die Leistungsaufnahme $\tilde{P}(Q, h)$ auf den Förderstrom Q bezogen, d.h. durch ihn geteilt wird:

$$P_Q(Q, h) := \frac{\tilde{P}(Q, h)}{Q}. \quad \text{Gl. 12a}$$

[0045] Figur 4 zeigt eine grafische Darstellung des spezifischen Energieverbrauchs in Abhängigkeit des Förderstroms Q und des Pegelstands h für ein beispielhaftes Pumpenaggregat 2 und eine beispielhafte Anlagenkennlinie. Es wird deutlich, dass der spezifische Energieverbrauch für jeden Pegelstand h ein Minimum etwa im Bereich zwischen $1/3$ und $1/2$ des Maximalförderstroms aufweist.

[0046] Der energetisch optimale Förderstrom Q_{opt} wird durch Minimierung des spezifischen Energieverbrauchs $P_Q(Q, h)$ über dem Förderstrom Q für einen bestimmten, insbesondere den gemessenen Pegelstand $h(t)$ errechnet.

$$Q_{opt} := \underset{Q}{\operatorname{argmin}} P_Q(Q, h(t)). \quad \text{Gl. 13a}$$

[0047] Das heißt, es wird derjenige Förderstrom Q_{opt} berechnet, bei dem der Energieverbrauch ($P_Q(Q_{opt}, h)$) minimal ist, siehe Schritt 22 in Figur 2. Die zugehörige Drehzahl $n(Q_{opt}, h)$, d.h. diejenige optimale Drehzahl, die erforderlich ist, um den optimalen Förderstrom Q_{opt} zu fördern, wird mit Gleichung 9a bestimmt, siehe Schritt 24 in Figur 1. Diese Drehzahl $n(Q_{opt}, h)$ wird dann am Pumpenaggregat 2 eingestellt.

[0048] Die beschriebene erste Variante des Verfahrens sieht folglich vor, dass zunächst der optimale Förderstrom Q_{opt} ermittelt wird, vorzugsweise nach Gleichung 13, und anschließend diejenige Drehzahl $n(Q_{opt}, h)$ berechnet wird, vorzugsweise nach Gleichung 9a, die bei dem Pumpenaggregat 2 eingestellt werden muss, damit es den gewünschten optimalen Förderstrom Q_{opt} fördert.

[0049] Gemäß der zweiten Variante des Verfahrens wird die optimale Drehzahl n_{opt} direkt aus der Minimierung des

volumenstromspezifischen Energieverbrauchs berechnet, indem dieser über die Drehzahl n minimiert wird. Dies hat den Vorteil, dass nicht erst der optimale Förderstrom berechnet werden muss. Dies setzt allerdings voraus, dass die den volumenstromspezifischen Energieverbrauch beschreibende Funktion nicht vom Förderstrom Q abhängig ist. Die Herleitung einer entsprechenden Berechnungsvorschrift wird nachfolgend wiedergegeben. Dabei werden nur diejenigen Aspekte der zweiten Variante des Verfahrens erläutert, die zu der ersten Variante unterschiedlich sind. Im Übrigen gelten die vorstehenden Erläuterungen zu der ersten Variante für die zweite Variante ebenfalls.

[0050] Wie zuvor zur ersten Variante erläutert, liegen alle Betriebspunkte des Pumpenaggregats 2 dort, wo sich das eine aktuelle Kennlinie aus dem Pumpenkennfeld $H_P(Q, n)$ und die Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$ schneiden. Diese Schnittmenge kann durch eine Gleichsetzung der Gleichungen 5 und 6 beschrieben und ermittelt werden. In Gleichung 9a war die Schnittmenge nach der Drehzahl $n(Q, h)$ aufgelöst, die für den Erhalt eines bestimmten Förderstroms Q bei einem bestimmten Pegel h erforderlich ist. Die Schnittmenge kann jedoch auch nach dem Förderstrom $Q(n, h)$ aufgelöst werden, der sich bei der Einstellung einer bestimmten Drehzahl n bei einem Pegel h ergibt. Ein bestimmter, gesuchter Förderstrom Q ergibt sich dann gerade als Lösung der Gleichung $H_{P,n}(Q, n) = H_A(Q, h)$. Es ergibt sich dann die folgende Funktion:

$$Q(n, h) := \frac{1}{2n_0(d_2 - a_2)} \left(a_1 n - d_1 n_0 + \sqrt{n_0^2(d_1^2 + 4(a_2 - d_2)(d_0 - h)) - 2nn_0a_1d_1 + n^2(a_1^2 + 4a_0(d_2 - a_2))} \right). \quad \text{Gl. 9b}$$

[0051] Die Leistungsaufnahme $P(Q, n)$ für einen beliebigen Förderstrom Q und eine bestimmte Drehzahl n , berechnet sich nach Gleichung 7. In dieser Gleichung 7 kann der allgemeine Förderstrom Q durch $Q(n, h)$ ersetzt werden. Dies ist gerade derjenige Förderstrom, der sich bei einer bestimmten Füllstandshöhe h und der Drehzahl n einstellt. D.h. der Förderstrom Q kann durch den rechten Teil von Gleichung 9b ersetzt werden:

$$P_n(Q(n, h), n) = \frac{\left(\frac{n}{n_0}\right)^3 P_{n_0}\left(\frac{n_0}{n} Q(n, h)\right)}{\eta_{ges}(n)} \quad \text{Gl. 10b}$$

[0052] Man erhält damit einen mathematischen Ausdruck zur Bestimmung der Leistungsaufnahme $P_n(Q(n, h), n)$, der nicht mehr abhängig vom Förderstrom Q , sondern nur noch abhängig vom Pegelstand h und der Drehzahl n ist. Somit kann nach Gleichung 11 a die Leistungsaufnahme $P(n, h)$ für einen beliebigen Pegel h berechnet werden, die sich bei Einstellen einer bestimmten Drehzahl n ergibt:

$$\tilde{P}(n, h) := P_n(Q(n, h), n) \quad \text{Gl. 11b}$$

[0053] Der volumenstromspezifische Energieverbrauch $P_Q(n, h)$ ergibt sich wie bei der ersten Variante dadurch, dass die pegelstandsabhängige Leistungsaufnahme $\tilde{P}(n, h)$ auf den Förderstrom Q bezogen, d.h. durch ihn geteilt wird. Als pegelstandsabhängige Leistungsaufnahme wird nun jedoch ein mathematischer Ausdruck verwendet, der nur noch von der Drehzahl und dem Pegelstand abhängig ist, wobei auch hier wieder ein konstanter Pegelstand Verwendung finden kann:

$$P_Q(n, h) := \frac{\tilde{P}(n, h)}{Q(n, h)}. \quad \text{Gl. 12b}$$

[0054] Die energetisch optimale Drehzahl n_{opt} wird dann durch Minimierung des spezifischen Energieverbrauchs $P_Q(n, h)$ über der Drehzahl für einen bestimmten, insbesondere den gemessenen Pegelstand $h(t)$ berechnet.

$$n_{opt} := \underset{n}{\operatorname{argmin}} P_Q(n, h(t)).$$

Gl. 13b

[0055] Beim energieeffizienten Betrieb des drehzahlregelbaren Pumpenaggregats 2 sollte darauf geachtet werden, dass der optimale Förderstrom Q_{opt} nicht unterschritten wird, da der spezifische Energieverbrauch bei kleineren Drehzahlen stark ansteigt. So lange und so oft es möglich ist, sollte das Pumpenaggregat 2 mit der optimalen Drehzahl n_{opt} oder $n(Q_{opt}, h)$ betrieben werden. Dies sollte sinnvollerweise zumindest dann der Fall sein, wenn der Zufluss Q_{in} den Wert des optimalen Förderstroms Q_{opt} nicht übersteigt, d.h. weniger Wasser in den Pumpensumpf 3 hinein läuft als herausgepumpt wird.

[0056] Vorzugsweise sind das Pumpenkennfeld $H_p(Q, n)$, das Leistungsaufnahmekennfeld $P(Q, n)$ und die Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$ in der dem Pumpenaggregat 2 zugeordneten Pumpenelektronik 8 hinterlegt. Das Pumpenaggregat (2) kann dann die optimale Drehzahl selbsttätig berechnen und einstellen.

[0057] Vorzugsweise wird das Pumpenaggregat 2 in Betriebsintervallen 10 betrieben, wobei die berechnete optimale Drehzahl für ein Betriebsintervall am Pumpenaggregat 2 eingestellt wird. Ein solches Betriebsintervall 10 ist in Figur 5 zu sehen, die Kurvenverläufe des Förderstroms Q (durchgezogene Linie) und des Zulaufs Q_{in} (gestrichelte Linie) zeigt.

[0058] Die Berechnung der optimalen Drehzahl $n_{opt}, n(Q_{opt}, h)$ kann grundsätzlich zu jedem Zeitpunkt erfolgen. Wird das Pumpenaggregat aber in Betriebsintervallen betrieben, so wird die ermittelte optimale Drehzahl natürlich erst bei dem nächsten Betriebsintervall eingestellt. Insbesondere kann aber die Berechnung sowohl vor als auch während eines Betriebsintervalls erfolgen.

[0059] Geeigneterweise wird das Pumpenaggregat 2 eingeschaltet, wenn ein vorgegebener oberer Pegelgrenzwert h_o erreicht oder überschritten wird, und abgeschaltet, wenn ein vorgegebener unterer Pegelgrenzwert h_u erreicht oder unterschritten wird. Dies entspricht einer Zweipunktsteuerung des Pumpenaggregats 2. Für den Zeitraum dieses Betriebsintervalls wird das Pumpenaggregat 2 idealerweise mit der berechneten optimalen Drehzahl $n_{opt}, n(Q_{opt}, h)$ betrieben.

[0060] Bei dieser beispielhaften, pegelstandsabhängigen Aktivierung des Pumpenaggregats wird deutlich, dass der Pegelstand h grundsätzlich nicht als veränderliche Größe in die Berechnung der optimalen Drehzahl eingehen muss. Denn wenn das Pumpenaggregat erst bei Erreichen des oberen Pegelgrenzwert h_o eingeschaltet wird, liegt ohnehin der aktuelle Pegelstand in etwa bei diesem oberen Pegelgrenzwert h_o , so dass dieser stets für die Berechnung der optimalen Drehzahl $n_{opt}, n(Q_{opt}, h_o)$ verwendet werden kann. Wird die optimale Drehzahl $n_{opt}, n(Q_{opt}, h)$ während eines Betriebsintervalls erneut berechnet, kann der aktuelle oder ein mittlerer Pegelstand für die Berechnung verwendet werden.

[0061] Der obere Pegelgrenzwert h_o kann beispielsweise zwischen 75% und 85% eines maximalen Pegelstands h_{max} betragen. Der untere Pegelgrenzwert h_u kann beispielsweise der Minimalpegel h_{min} sein oder zwischen 25% und 35% des maximalen Pegelstands h_{max} betragen.

[0062] Es ist aber von Vorteil, wenn der Wasserstand im Pumpensumpf 3 so hoch es geht gehalten wird. Hierdurch werden die geodätische Höhe H_{geo} und somit die Reibungsverluste reduziert. Dies wird dadurch erreicht, dass der untere Pegelgrenzwert h_u vergleichsweise hoch gewählt wird, beispielsweise zwischen 40% und 60% des maximalen Pegelstands h_{max} . In diesem Fall wird das Pumpenaggregat 2 also so betrieben, dass der Pegel h im Pumpensumpf 3 zwischen 40% und 85%, vorzugsweise zwischen 50% und 75% gehalten wird.

[0063] Wird das Pumpenaggregat 2 bei oder nach dem Erreichen des oberen Pegelgrenzwerts h_o eingeschaltet, wird solange gepumpt, bis der untere Pegelgrenzwert h_u erreicht ist. Das Pumpenaggregat 2 wird dann wieder abgeschaltet und erst dann wieder eingeschaltet, wenn der obere Pegelgrenzwert h_o erreicht ist. Hierdurch wird ein Betrieb in der Art einer Hysterese realisiert.

[0064] Figur 3 veranschaulicht dieses Verfahren. Analog zu Figur 2 wird der Pegelstand im Pumpensumpf 3 in Schritt 20 gemessen und anschließend die optimale Drehzahl $n_{opt}, n(Q_{opt}, h)$ wie oben anhand einer der Varianten 1 oder 2 berechnet, Schritt 24. Anschließend wird der Pegelstand h ausgewertet. Erreicht oder übersteigt er den oberen Grenzwert h_o , siehe Schritt 21, wird das Pumpenaggregat 2 eingeschaltet und mit dieser berechneten Drehzahl $n_{opt}, n(Q_{opt}, h)$ betrieben, Schritt 26. Der Pumpensumpf 3 wird dadurch zunehmend geleert, sofern der Zulauf geringer als der Förderstrom ist. Der Pegelstand h sinkt dann unter den oberen Pegelgrenzwert h_o , so dass die Bedingung in Schritt 21 nicht mehr erfüllt ist. Der Betrieb des Pumpenaggregats 2 erfolgt im Normalfall so lange, bis der Pegelstand h unter den unteren Grenzpegel h_u abgesunken ist. Dies wird in Schritt 23 überprüft. Ist diese Bedingung erfüllt, wird das Pumpenaggregat 2 wieder abgeschaltet, Schritt 27.

[0065] Während des Betriebsintervalls 10 kann das Pumpenaggregat 2 konstant mit der optimalen Drehzahl betrieben werden. Alternativ kann während des Betriebs die optimale Drehzahl immer wieder neu berechnet und eingestellt werden, um den aktuellen Füllstand h zu berücksichtigen. In dem Fall wird das Pumpenaggregat 2 nicht mit einer festen Drehzahl betrieben. Vielmehr wird die Betriebsdrehzahl an den Füllstand 7 im Pumpensumpf 3 angepasst, d.h. die für den jeweiligen Füllstand 7 optimale Drehzahl $n_{opt}, n(Q_{opt}, h)$ eingestellt. Dies kann insbesondere auch dann erfolgen, wenn der obere

Grenzpegel h_o schon unterschritten, d.h. die Bedingung in Schritt 21 nicht (mehr) erfüllt ist, der untere Grenzpegel h_u aber noch nicht erreicht ist, d.h. auch die Bedingung in Schritt 23 noch nicht erreicht ist. Dies ist in Figur 3 nicht dargestellt.

[0066] Sinnvollerweise erfolgt die Zweipunktsteuerung nur dann und insbesondere nur solange der Zufluss Q_{in} kleiner als der berechnete optimale Förderstrom Q_{opt} ist, da der Pegel anderenfalls weiter steigt und der Pumpensumpf 3 unter Umständen überlaufen könnte.

[0067] Ist der Zufluss Q_{in} größer als der aktuelle Förderstrom Q , kann anstelle des Betriebs des Pumpenaggregats 2 mit optimaler Drehzahl n_{opt} eine höhere Drehzahl als die optimale Drehzahl n_{opt} , $n(Q_{opt}, h)$ eingestellt werden, beispielsweise die Maximaldrehzahl n_{max} oder eine solche Drehzahl, mit welcher ein vorgegebener Pegelstand realisiert wird, vorzugsweise der obere Pegelgrenzwert h_o . Anstelle einer Überprüfung, ob der Zufluss Q_{in} größer als der berechnete optimale Förderstrom Q_{opt} ist, kann geprüft werden, ob der Pegelstand h im Pumpensumpf 3 einen Maximalpegel h_{max} erreicht oder überschreitet. Dies kann Gegenstand der Überprüfung in Schritt 25 von Figur 3 sein. Ist dies der Fall, kann mit einer höheren Drehzahl als der optimalen Drehzahl, beispielsweise mit einer Maximaldrehzahl gefördert werden, siehe Schritt 29. Ist der Zufluss Q_{in} dagegen nicht größer als der aktuelle Förderstrom oder überschreitet der Pegelstand den Maximalwert h_{max} während eines Betriebsintervalls 10 nicht, so wird das Verfahren am Anfang fortgesetzt, Schritt 20.

[0068] Im Laufe des Betriebs kann sich die Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$ des Pumpensystems, d.h. die Koeffizienten d_0 , d_1 , d_2 , nach Gleichung 4 bzw. 5 ändern, beispielsweise aufgrund von Ablagerungen, die zu einem höheren Strömungswiderstand führen. Da die Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$ für die Berechnung des optimalen Förderstroms Q_{opt} bzw. der optimalen Drehzahl n_{opt} , $n(Q_{opt}, h)$ aber zwingend erforderlich ist, kann sie im Betrieb neu bestimmt werden, bzw. die Koeffizienten d_0 , d_1 , d_2 angepasst werden.

[0069] Dies kann anhand von mindestens drei Betriebspunkten des Pumpenaggregats 2 erfolgen, wobei insbesondere der Förderstrom Q_i für mindestens drei verschiedene Drehzahlen n_i ermittelt wird. Der Förderstrom Q kann beispielsweise mittels des Volumenstromsensors 9 gemessen werden. Eine Anzahl von mindestens drei verschiedenen Drehzahlen n_i wird innerhalb eines bestimmten Zeitraums gefahren. Dieser Zeitraum kann ein oder mehrere Betriebsintervalle 10, vorzugsweise drei Betriebsintervalle 10 umfassen. Dies hat den Vorteil, dass das Pumpenaggregat 2 in jedem Betriebsintervall 10 mit nur einer Drehzahl n , die dann vorzugsweise die erfindungsgemäß berechnete optimale Drehzahl n_{opt} , $n(Q_{opt}, h)$ entsprechen kann. Der Zeitraum kann beispielsweise 24 Stunden betragen.

[0070] Idealerweise wird das Anfahren der verschiedenen Drehzahlen n_i in Abständen, insbesondere regelmäßig, vorzugsweise einmal pro Tag wiederholt, um die Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$ quasi kontinuierlich zu überwachen bzw. eine Veränderung der Anlagenkennlinie (z.B. Ablagerungen, Verstopfung) zu erkennen. Ferner ist es von Vorteil, wenn jede Drehzahl n_i eine bestimmte Anzahl von Malen wiederholt, beispielsweise jeweils zweimal angefahren wird, um Messfehler oder Berechnungsfehler auszugleichen.

[0071] So kann das Pumpenaggregat 2 beispielsweise während sechs Betriebsintervallen 10 mit drei verschiedenen Drehzahlen n_i betrieben werden, d.h. jeweils ein Betriebsintervall 10 mit einer festen Drehzahl n und zwei Betriebsintervalle 10 mit der gleichen Drehzahl. Um die Genauigkeit der Bestimmung der Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$ zu erhöhen, ist es von Vorteil, mehr als drei, beispielsweise vier verschiedene Drehzahlen zu verwenden. Entsprechend können diese vier Drehzahlen n_i während acht Betriebsintervallen 10 gefahren werden.

[0072] Für jedes Betriebsintervall 10 kann jeweils ein Förderstrom Q und ein Pegel h als Mittelwert der Förderströme Q bzw. der Wasserstände h des entsprechenden Betriebsintervalls 10 bestimmt werden. Die Pegelbestimmung kann durch Messung des Pegels h mittels Sensor 11 und rechnerische Mittelwertbildung erfolgen. Die Förderstrombestimmung kann ebenfalls durch Messung des Förderstroms mittels Sensor 9 und rechnerische Mittelwertbildung erfolgen.

[0073] Unter Verwendung des Pumpenkennfeldes $H_p(Q, n)$ kann dann für eine der verwendeten Drehzahlen n_i die Förderhöhe H bestimmt werden, beispielsweise nach Gleichung 6. Alternativ kann die Berechnung der Förderhöhe H auch anhand der in Gleichung 6 eingesetzten Gleichung 9a unter Verwendung des Pegelstands h erfolgen. Die Drehzahl n_i wird dann nicht benötigt.

[0074] Die Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$ nach Gleichung 5 respektive ihre Koeffizienten d_1 , d_2 können dann durch Approximation so bestimmt werden, dass die Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$ optimal zu den Werte-Tripeln (Q_i, h_i, H_i) , $i = 1, \dots, m \cdot n$, für die m Mal verwendeten n Drehzahlen passt. Insbesondere kann dann auch der Abstand d_0 zwischen dem Pumpensumpfboden 3 und der geodätisch höchsten Stelle der Druckleitung 6 ermittelt werden.

[0075] Auf diese Weise kann nicht nur zu Beginn des Verfahrens sondern auch dynamisch während des bestimmungsgemäßen Gebrauchs des Pumpenaggregats 2 die mathematische Beschreibung des Anlagenkennfeldes $H_A(Q, h)$ immer wieder auf den aktuellen Zustand des Pumpensystems 1 angepasst werden. Ein erhöhter Rohrleitungswiderstand, beispielsweise infolge von Ablagerungen in der Druckleitung 6, kann dann unmittelbar bei der energieeffizienten Regelung gemäß der vorliegenden Erfindung berücksichtigt werden.

[0076] Auf Basis des aktuellen Leistungsaufnahmekennfeldes $P(Q, n)$ kann im Anschluss an eine Neubestimmung des aktuellen Anlagenkennfeldes $H_A(Q, h)$ der spezifische Energieverbrauch $P_Q(Q, n)$ und die energetisch optimale Drehzahl n_{opt} , $n(Q_{opt}, h)$ berechnet werden. Dies erfolgt vorzugsweise zwischen zwei Betriebsintervallen 10 für einen bestimmten Pegelstand h , beispielsweise für den oberen Pegelgrenzwert h_o oder für eine Vielzahl verschiedener Pegel h . Die berechnete Drehzahl n_{opt} , $n(Q_{opt}, h)$ wird dann für das nächste Betriebsintervall 10 verwendet.

[0077] Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung können gleitende Werte-Tripel (Q_i, h_i, H_i) verwendet werden. Dies bedeutet, dass zwar die Anzahl der Werte-Tripel gleich bleibt, jedoch ein altes, insbesondere das zeitlich zuerst ermittelte Werte-Tripel (Q_1, h_1, H_1) verworfen und ein neues Werte-Tripel $(Q_{m \cdot n}, h_{m \cdot n}, H_{m \cdot n})$ hinzugenommen, insbesondere hinten angefügt wird. Hierzu kann nach Beendigung des Betriebsintervalls 10 ein weiterer über das Betriebsintervall 10 gemittelter Förderstrom $Q_{m \cdot n}$ und Pegel $h_{m \cdot n}$ und daraus die Förderhöhe $H_{m \cdot n}$ ermittelt, werden. Anschließend kann dann das Anlagenkennfeld $H_A(Q, h)$ unter Hinzunahme der bereits vorhandenen Werte (Q_i, h_i, H_i) , $i = 1, \dots, (m \cdot n) - 1$ aktualisiert werden. Unter Verwendung des neuen Anlagenkennfeldes $H_A(Q, h)$ kann dann eine neue optimale Drehzahl n_{opt} , $n(Q_{\text{opt}}, h)$ berechnet und für das nächste Betriebsintervall 10 verwendet werden. Das Verfahren beginnt dann wieder von vorn.

[0078] Ausgehend von der vorgegebenen Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$ kann eine Überwachung des Pumpensystems dadurch erfolgen, dass im Betrieb des System wiederholt die Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$ erneut bestimmt wird und die neuen Koeffizienten d_0, d_1, d_2 , mit den ursprünglichen Koeffizienten verglichen werden. Eine Abweichung, insbesondere eine zunehmende Abweichung oder eine Abweichung um einen bestimmten Betrag deutet auf eine Verschlechterung des Anlagenzustands, beispielsweise auf eine Ablagerung in der Druckleitung hin.

[0079] Zusätzlich oder alternativ zur Neubestimmung der Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$ kann auch eine Korrektur des Leistungsaufnahmekennfeldes $P(Q, n)$, d.h. eine Neubestimmung der Koeffizienten b_0, b_1, b_2 und b_3 in Gleichung 3 erfolgen. Hierfür wird eine Anzahl von mindestens vier verschiedenen Betriebspunkten verwendet und jeweils die Ist-drehzahl n_i , der Förderstrom Q_i und die elektrische Leistungsaufnahme P_i ermittelt. Die elektrische Leistungsaufnahme P_i und die Drehzahl n_i können gemessen oder rechnerisch aus elektrischen Größen des Frequenzumrichters bestimmt werden. Der Förderstrom Q kann ebenfalls gemessen werden. Aus diesen Werten Q_i, P_i und n_i kann das Leistungsaufnahmekennfeld $P(Q, n)$ neu approximiert werden, vorzugsweise durch die mathematischen Methoden der Ausgleichsrechnung. Je mehr Betriebspunkte hierfür zur Verfügung stehen, umso genauer ist die Approximation. Vorteilhafterweise kann daraus dann auch der Parameter c aus Gleichung 8 bestimmt werden. Das Leistungskennfeld $P(Q, n)$ wird dadurch besser abgebildet und damit auch die spezifische Energie genauer berechnet.

[0080] Vorzugsweise kann die Neubestimmung der Anlagenkennlinie $H_A(Q, h)$ und/ oder des Leistungsaufnahmekennfeldes $P(Q, n)$ zwischen zwei Betriebsintervallen 10 des Pumpenaggregats 2 erfolgen. Dabei können Betriebspunkte aus dem letzten Betriebsintervall verwendet werden, die im Rahmen der Regelung oder speziell zur späteren Neubestimmung des Anlagenkennfeldes $H_A(Q, h)$ und/ oder des Leistungsaufnahmekennfeldes $P(Q, n)$ angefahren worden sind.

[0081] Als Ausnahmebedingungen, die in Schritt 28 nach Figur 2 geprüft werden können, sind beispielsweise folgende Maßnahmen sinnvoll:

[0082] Übersteigt der Zulauf Q_{in} den Förderstrom Q_{opt} bei optimaler Drehzahl n_{opt} , $n(Q_{\text{opt}}, h)$ ist es von Vorteil, die Drehzahl gerade so anzupassen, dass der Pegelstand h nicht weiter steigt. Dies bedeutet, dass der aus dem Pumpensumpf 3 heraus zu fördernde Förderstrom Q gerade dem Zufluss Q_{in} entsprechen muss. Die hierfür erforderliche Drehzahl $n(Q=Q_{\text{in}}, h)$ kann z.B. mit Gleichung 9a berechnet werden, indem für den Förderstrom Q der Zulauf Q_{in} eingesetzt wird.

[0083] Um Ablagerungen in der an das Pumpenaggregat 2 angeschlossenen Druckrohrleitung 6 zu vermeiden, kann das Pumpenaggregat 2 bevorzugt in regelmäßigen Abständen, beispielsweise alle 3 Stunden, bei Nenndrehzahl n_0 betrieben werden. Dies führt dazu, dass die Druckleitung 6 und der nachfolgende Ablauf 5 durchgespült werden. Alternativ kann eine derartige Spülung dann erfolgen, wenn die Neuberechnung des Anlagenkennfeldes erkennen lässt, dass sich der Rohrleitungswiderstand erhöht, insbesondere um einen bestimmten Betrag erhöht hat.

Patentansprüche

- Verfahren zum energieoptimalen Betrieb eines offenen Pumpensystems (1) zum Flüssigkeitstransport, mit zumindest einem drehzahlregelbaren Pumpenaggregat (2), das die Flüssigkeit aus einem Behältnis (3) fördert, **dadurch gekennzeichnet, dass** in Abhängigkeit zumindest einer herstellerseitig vorgegebenen Anlagenkennlinie ($H_A(Q, h)$) durch Auswertung einer mathematischen Funktion (Gl. 12a, 12b), die einem zu fördernden Förderstrom (Q) den dafür benötigten volumenstromspezifischen Energieverbrauch ($P_Q(Q, h)$, $P_Q(n, h)$) des Pumpenaggregats (2) zuordnet, diejenige Drehzahl (n_{opt} , $n(Q_{\text{opt}}, h)$) berechnet wird, bei der der volumenstromspezifische Energieverbrauch ($P_Q(Q_{\text{opt}}, h)$, $P_Q(n, h)$) minimal ist, und dass das Pumpenaggregat (2) mit dieser berechneten optimalen Drehzahl (n_{opt} , $n(Q_{\text{opt}}, h)$) betrieben wird.
- Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die optimale Drehzahl (n_{opt}) direkt aus der Minimierung des volumenstromspezifischen Energieverbrauchs ($P_Q(n, h)$) über der Drehzahl (n) berechnet wird.
- Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die optimale Drehzahl ($n(Q_{\text{opt}}, h)$) aus der Minimierung des volumenstromspezifischen Energieverbrauchs ($P_Q(Q_{\text{opt}}, h)$) über dem Förderstrom (Q) berechnet wird, indem zunächst derjenige Förderstrom (Q_{opt}) berechnet wird, bei dem der volumenstromspezifische Energieverbrauch

($P_Q(Q_{opt}, h)$) minimal ist, und anschließend diejenige Drehzahl ($n(Q_{opt}, h)$) berechnet wird, die erforderlich ist, um den berechneten Volumenstrom (Q_{opt}) zu fördern, und dass das Pumpenaggregat (2) mit dieser berechneten optimalen Drehzahl (n_{opt} , $n(Q_{opt}, h)$) betrieben wird.

4. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die mathematische Funktion (Gl. 12a, 12b) unter Verwendung jeweils einer herstellerseitig vorgegebenen, das Pumpenkennfeld ($H_P(Q, n)$), das Leistungsaufnahmekennfeld ($P(Q, n)$) sowie zumindest eine Anlagenkennlinie ($H_A(Q, h)$) der Pumpstation (1) beschreibenden Funktion (Gl. 5, 6, 7) gebildet ist, wobei das Pumpenkennfeld ($H_P(Q, n)$) durch die Pumpenkennlinie ($H_{P,n_0}(Q)$) bei Nenndrehzahl (n_0) und Anwendung eines Affinitätsgesetzes und das Leistungsaufnahmekennfeld ($P(Q, n)$) durch die Leistungsaufnahmekennlinie ($P_{n_0}(Q)$) bei Nenndrehzahl (n_0) und Anwendung eines Affinitätsgesetzes beschrieben ist.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Pumpenkennfeld ($H_P(Q, n)$) durch die Gleichung

$$H_{P,n}(Q, n) = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 H_{P,n_0}\left(\frac{n_0}{n} Q\right)$$

beschrieben wird, wobei $H_{P,n}$ die Förderhöhe, Q der Förderstrom, n die Drehzahl, n_0 die Nenndrehzahl und H_{P,n_0} die Pumpenkennlinie bei Nenndrehzahl sind.

6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Pumpenkennlinie ($H_{P,n_0}(Q)$) bei Nenndrehzahl (n_0) durch die Gleichung

$$H_{P,n_0}(Q) = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2$$

beschrieben wird, wobei H_{P,n_0} die Förderhöhe, Q der Förderstrom und a_0 , a_1 und a_2 Konstanten sind.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Leistungsaufnahmekennfeld ($P(Q, n)$) durch die Gleichung

$$P_n(Q, n) = \frac{\left(\frac{n}{n_0}\right)^3 P_{n_0}\left(\frac{n_0}{n} Q\right)}{\eta_{ges}(n)}$$

beschrieben wird, wobei P_n die Leistungsaufnahme, Q der Förderstrom, n die Drehzahl, n_0 die Nenndrehzahl, η_{ges} ein Gesamtwirkungsgrad und P_{n_0} die Leistungsaufnahmekennlinie bei Nenndrehzahl sind.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Leistungsaufnahmekennlinie ($P_{n_0}(Q)$) bei Nenndrehzahl (n_0) durch die Gleichung

$$P_{n_0}(Q) = b_0 + b_1 Q + b_2 Q^2 + b_3 Q^3$$

beschrieben wird, wobei P_{n_0} die Leistungsaufnahme, Q der Förderstrom und b_0 , b_1 , b_2 und b_3 Konstanten sind.

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Gesamtwirkungsgrad η_{ges} eine Reduzierung des Wirkungsgrades des Pumpenaggregats (2) bei abnehmender Drehzahl (n) der Gestalt

$$f_{\eta}(n) = -c \left(\left(\frac{n}{n_0} \right)^2 - \frac{2n}{n_0} + 1 \right) + 1$$

berücksichtigt, wobei f_{η} ein sich in Abhängigkeit der Drehzahl (n) ändernder Faktor, n die Drehzahl, n_0 die Nenndrehzahl und c eine nicht negative Konstante ist.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Berechnung der optimalen Drehzahl ($n(Q_{\text{opt}}, h)$) aus der Gleichsetzung einer Pumpenkennlinie $H_{P,n}(Q, n)$ des Pumpenkennfelds ($H_P(Q, n)$) beschreibenden mathematischen Funktion (Gl. 6) und der Anlagenkennlinie ($H_A(Q, h)$) erfolgt.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die optimale Drehzahl ($n(Q_{\text{opt}}, h)$) aus der Gleichung

$$n(Q, h) := \frac{n_0}{2a_0} \left(-a_1 Q + \sqrt{4a_0(d_0 - h + d_1 Q + (d_2 - a_2)Q^2) + a_1^2 Q^2} \right)$$

berechnet wird, wobei

n die Drehzahl,

Q ein zu erreichender Förderstrom, insbesondere der berechnete Förderstrom (Q_{opt}) ist,

h ein Pegelstand,

n_0 die Nenndrehzahl,

a_0 die Förderhöhe H bei $Q = 0$ für Nenndrehzahl,

a_1 eine einen linearen Volumenstromanteil der Pumpenkennlinie bei Nenndrehzahl gewichtende Konstante ist

a_2 eine einen quadratischen Volumenstromanteil der Pumpenkennlinie bei Nenndrehzahl gewichtende Konstante ist

d_0 der Abstand zwischen dem Boden des Behältnisses und der höchsten Stelle der Druckleitung 6,

d_1 eine einen linearen Volumenstromanteil der Anlagenkennlinie gewichtende Konstante ist

d_2 eine einen quadratischen Volumenstromanteil der Anlagenkennlinie gewichtende Konstante ist.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 3 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die mathematische Funktion (Gl. 12a) für den volumenstromspezifischen Energieverbrauch ($P_Q(Q, h)$) durch die Gleichungen

$$P_Q(Q, h) := \frac{P_n(Q, n(Q, h))}{Q}$$

und

$$P_n(Q, n(Q, h)) = \frac{\left(\frac{n(Q, h)}{n_0} \right)^3 P_{n_0} \left(\frac{n_0}{n(Q, h)} Q \right)}{\eta_{\text{ges}}(n)},$$

gebildet ist, wobei

Q der zu erreichende Förderstrom,

h einen Pegelstand,

n_0 die Nenndrehzahl,

η_{ges} ein Gesamtwirkungsgrad des Pumpenaggregats (2) in dem Pumpensystem (1),

n die aus der Gleichsetzung einer Pumpenkennlinie $H_{P,n}(Q, n)$ des Pumpenkennfelds $H_P(Q, n)$ beschreibenden mathematischen Funktion (Gl. 6) und der Anlagenkennlinie ($H_A(Q, h)$) berechnete Drehzahl für einen bestimmten Förderstrom und einen Pegelstand, und

P_{n0} die Leistungsaufnahmekennlinie bei Nenndrehzahl ist.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1, 2 oder 4 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die mathematische Funktion (Gl. 12b) für den volumenstromspezifischen Energieverbrauch ($P_Q(n, h)$) durch die Gleichungen

$$P_Q(n, h) := \frac{P_n(Q(n, h), n)}{Q(n, h)}$$

und

$$P_n(Q(n, h), n) = \frac{\left(\frac{n}{n_0}\right)^3 P_{n_0}\left(\frac{n_0}{n} Q(n, h)\right)}{\eta_{ges}(n)},$$

gebildet ist, wobei

Q der aus der Gleichsetzung einer Pumpenkennlinie $H_{P,n}(Q, n)$ des Pumpenkennfelds $H_P(Q, n)$ beschreibenden mathematischen Funktion (Gl. 6) und der Anlagenkennlinie (Gl. 5) berechnete Förderstrom für eine bestimmte Drehzahl und einen Pegelstand,

h ein Pegelstand,

n_0 die Nenndrehzahl,

η_{ges} ein Gesamtwirkungsgrad des Pumpenaggregats (2) in dem Pumpensystem (1),

n eine beliebige Drehzahl, und

P_{n0} die Leistungsaufnahmekennlinie bei Nenndrehzahl ist.

14. Verfahren nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Förderstrom ($Q(n, h)$) für eine bestimmte Drehzahl (n) und einen bestimmten Pegelstand (h) durch die Gleichung

$$Q(n, h)$$

$$:= \frac{1}{2n_0(d_2 - a_2)} \left(a_1 n - d_1 n_0 + \sqrt{n_0^2(d_1^2 + 4(a_2 - d_2)(d_0 - h)) - 2nn_0a_1d_1 + n^2(a_1^2 + 4a_0(d_2 - a_2))} \right)$$

gegeben ist, wobei

n die Drehzahl,

Q der zu berechnende Förderstrom ist,

h ein Pegelstand,

n_0 die Nenndrehzahl,

a_0 die Förderhöhe H bei $Q = 0$ für Nenndrehzahl,

a_1 eine einen linearen Volumenstromanteil der Pumpenkennlinie bei Nenndrehzahl gewichtende Konstante ist
 a_2 eine einen quadratischen Volumenstromanteil der Pumpenkennlinie bei Nenndrehzahl gewichtende Konstante ist
 d_0 der Abstand zwischen dem Boden des Behältnisses und der höchsten Stelle der Druckleitung 6,
 d_1 eine einen linearen Volumenstromanteil der Anlagenkennlinie gewichtende Konstante ist
 d_2 eine einen quadratischen Volumenstromanteil der Anlagenkennlinie gewichtende Konstante ist.

15. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Pumpenaggregat (2) in Betriebsintervallen (10) mit der optimalen Drehzahl (n_{opt} , $n(Q_{opt}, h)$) betrieben wird, wobei es eingeschaltet wird, wenn ein vorgegebener oberer Pegelgrenzwert (h_o) erreicht oder überschritten wird und abgeschaltet wird, wenn ein vorgegebener unterer Pegelgrenzwert (h_u) erreicht oder unterschritten wird.
16. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Pumpenaggregat (2) im Betrieb die Anlagenkennlinie ($H_A(Q, h)$) und/ oder das Leistungsaufnahmekennfeld ($P_n(Q, n)$) neu bestimmt.
17. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Pumpenkennfeld ($H_p(Q, n)$), das Leistungsaufnahmekennfeld ($P(Q, n)$) und die Anlagenkennlinie ($H_A(Q, h)$) in einer dem Pumpenaggregat (2) zugeordneten Pumpenelektronik (8) hinterlegt sind und das Pumpenaggregat (2) die optimale Drehzahl selbsttätig berechnet und einstellt.
18. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Anlagenkennlinie ($H_A(Q, h)$) einen Pegelstand (h) des Behältnisses (3) berücksichtigt, wobei dieser Pegelstand (h) der zeitveränderliche aktuelle Pegelstand ($h(t)$), oder ein mittlerer Pegelstand oder ein oberer Pegelgrenzwert (h_o) ist.

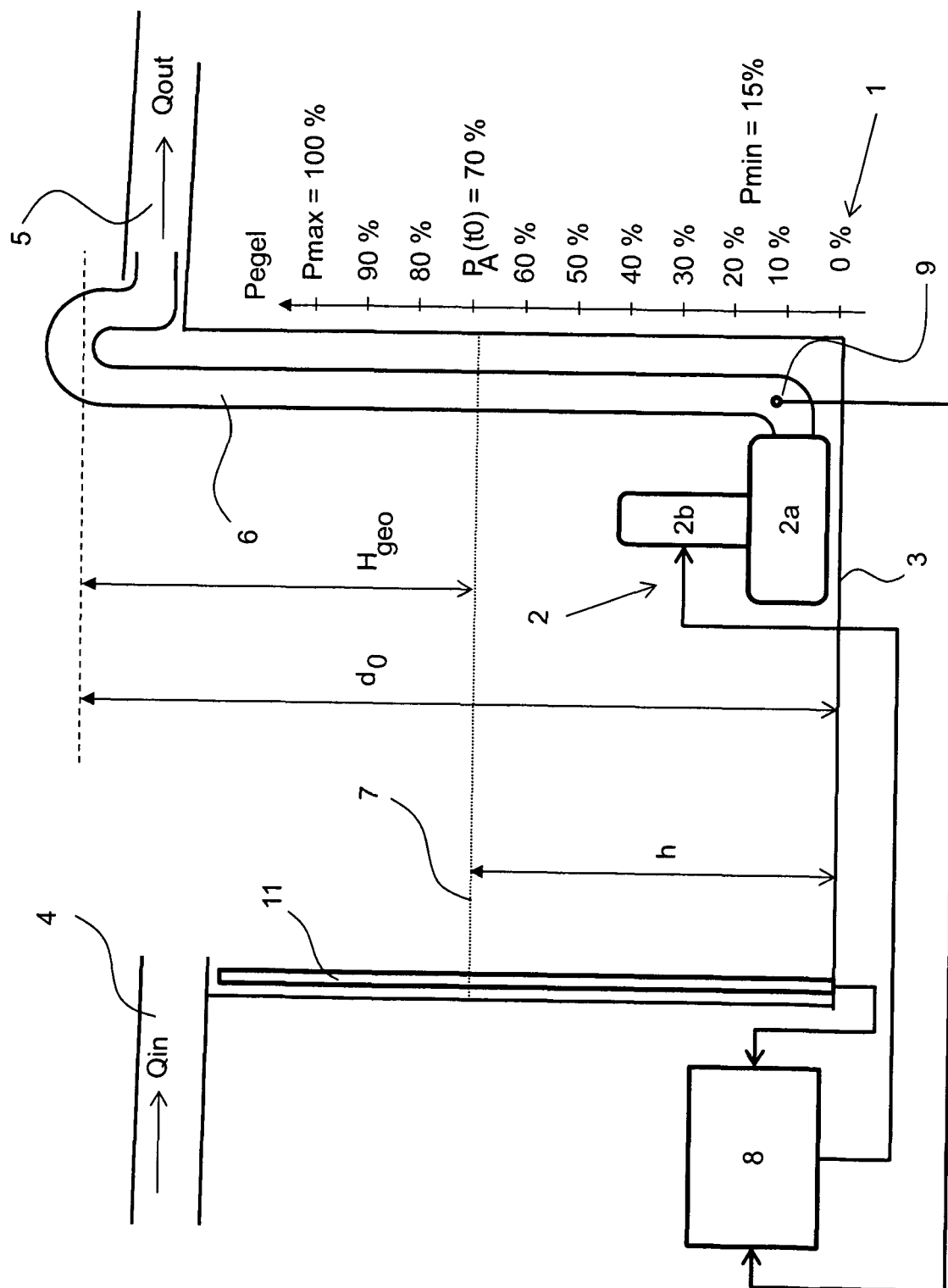


Fig. 1

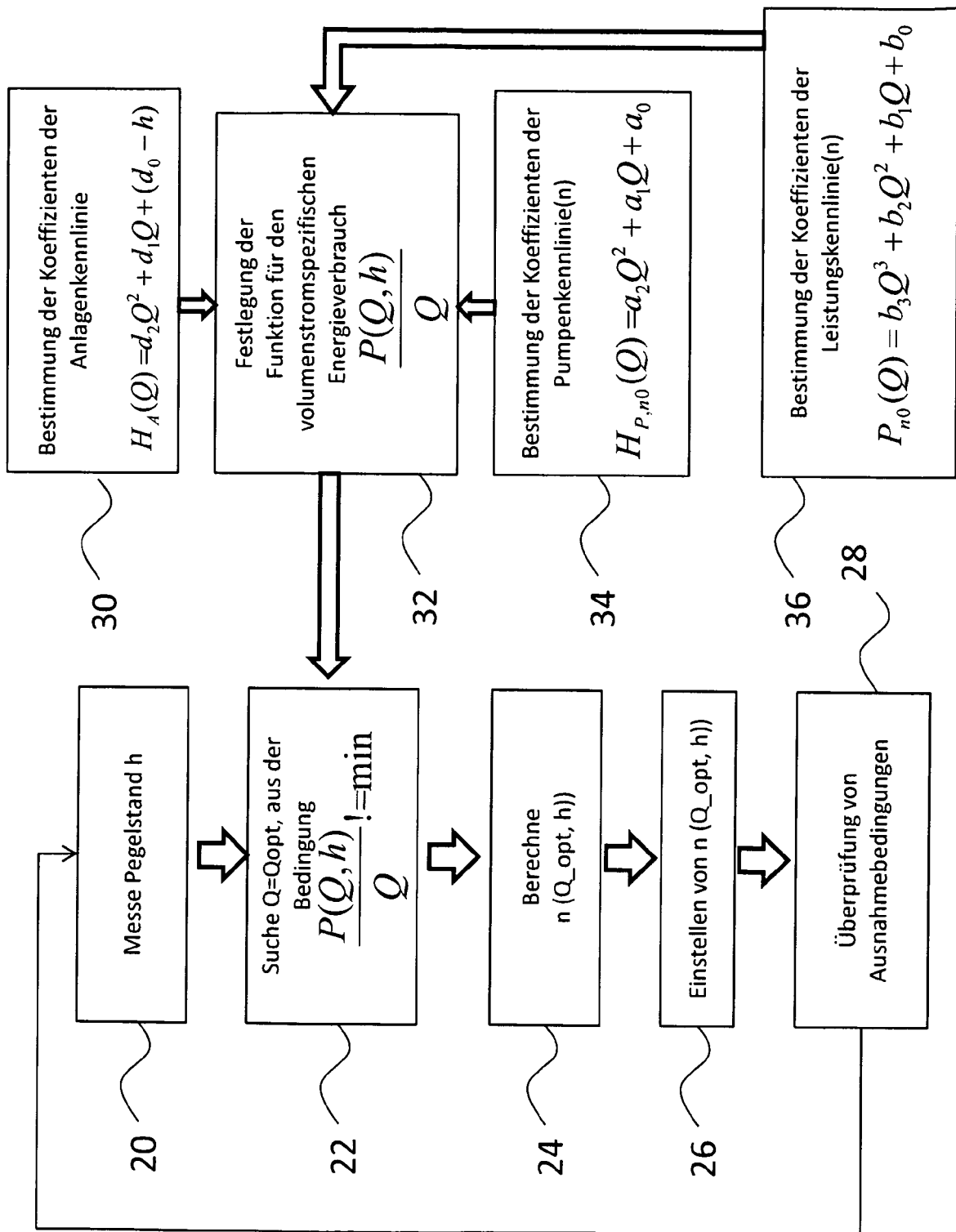


Fig. 2

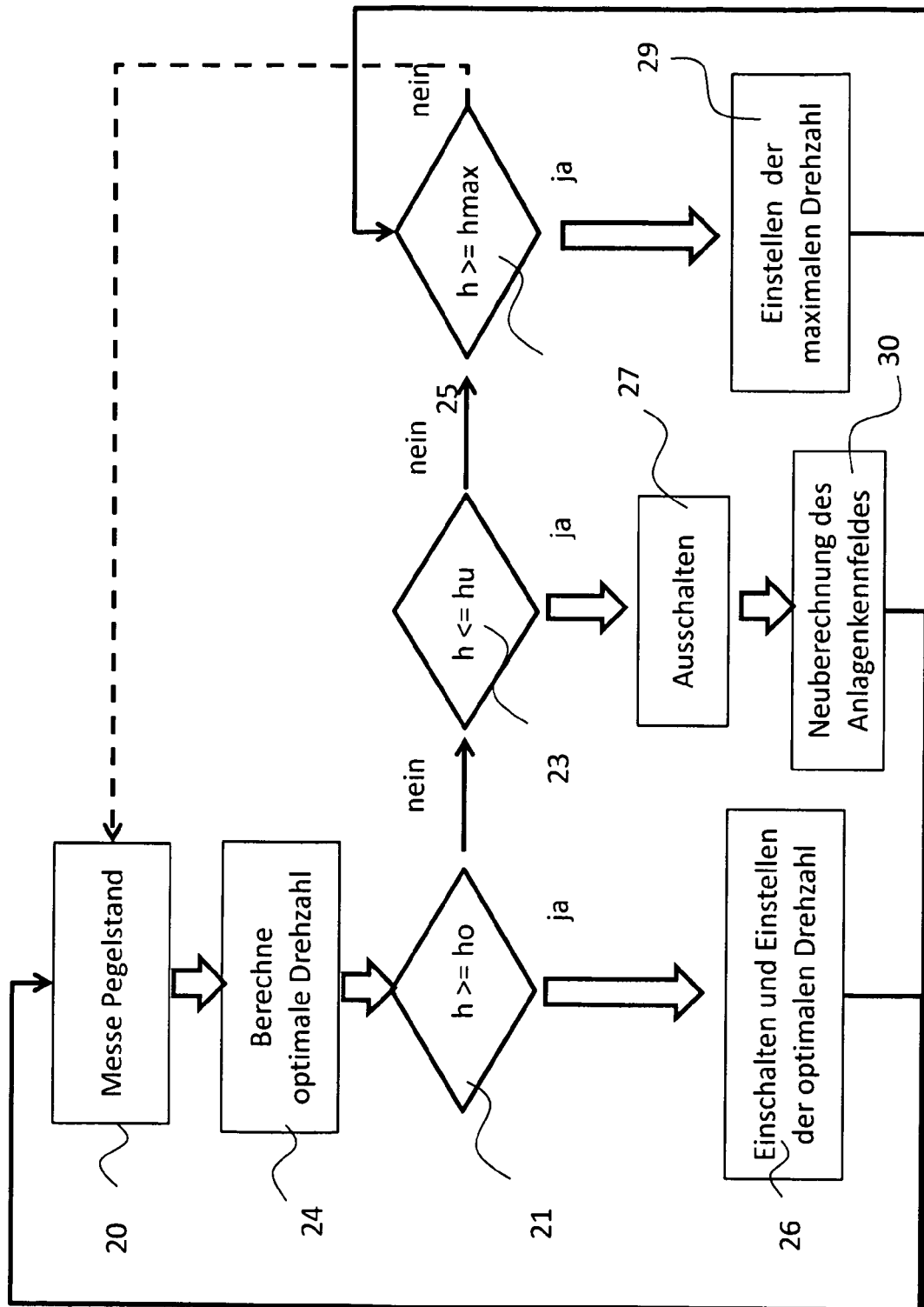


Fig. 3

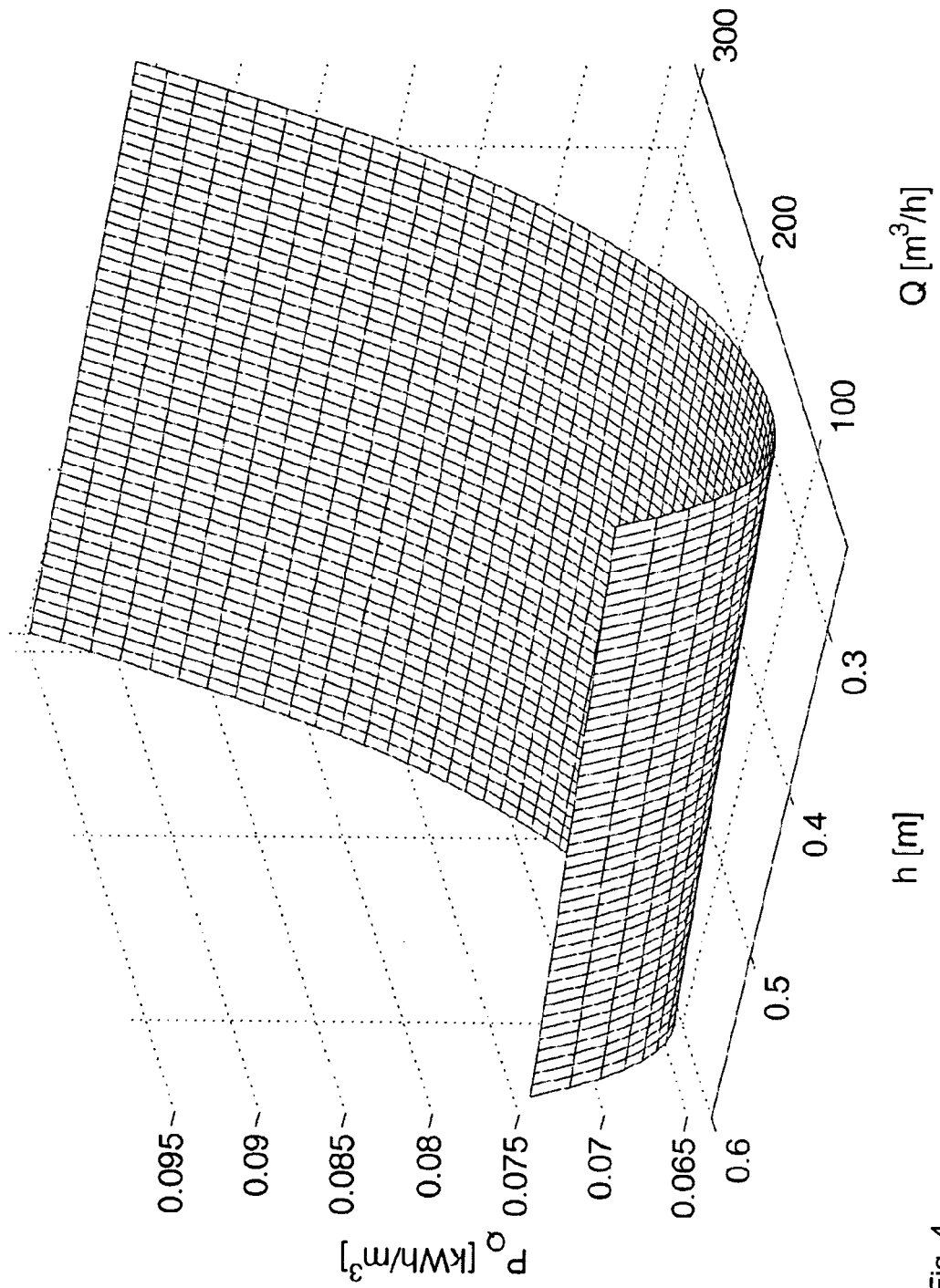


Fig. 4

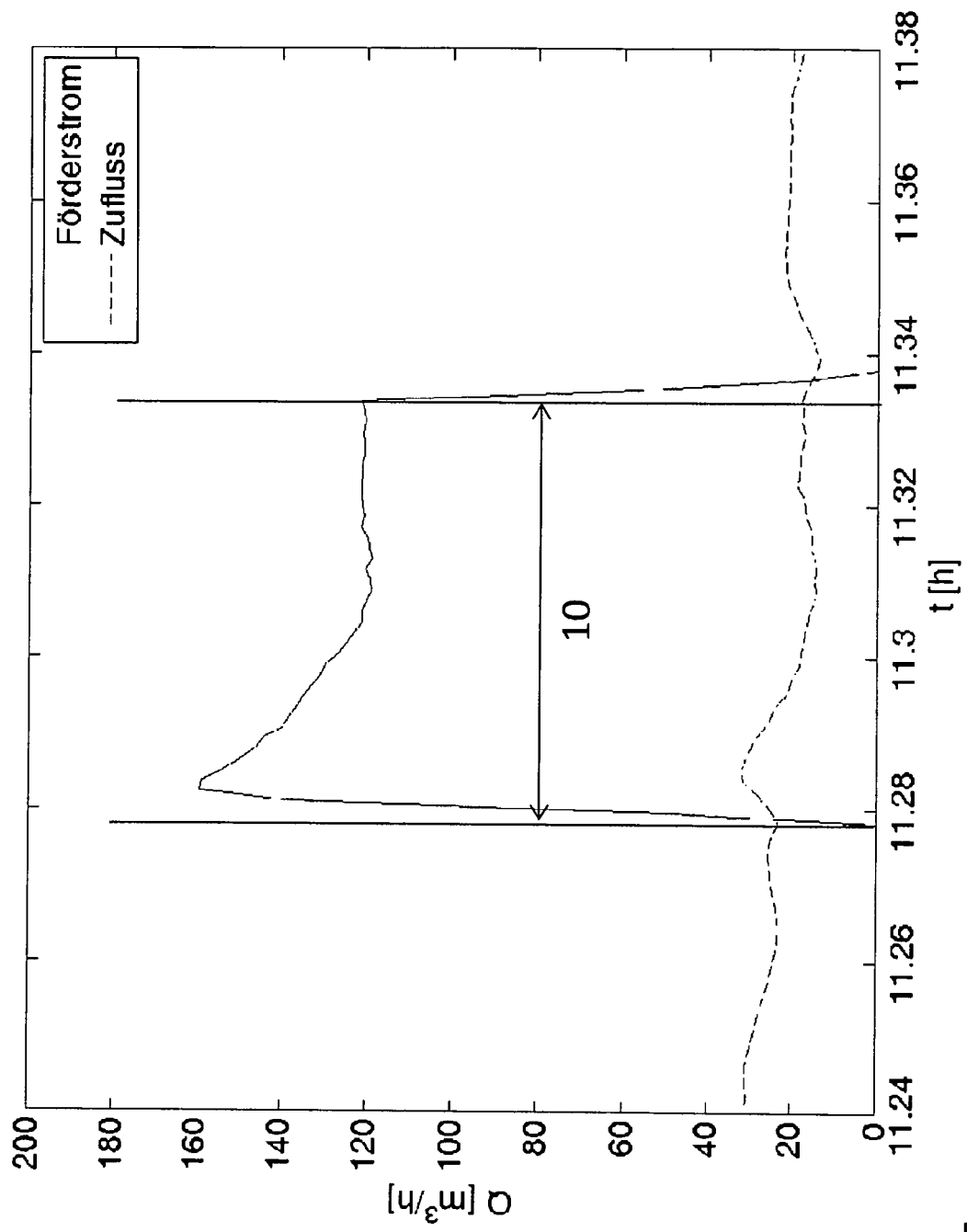


Fig. 5



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
EP 15 00 1441

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	US 2013/164146 A1 (AHOLA JERO [FI] ET AL) 27. Juni 2013 (2013-06-27)	1-8	INV. F04D15/00
A	* Absatz [0010] * * Absätze [0060] - [0066] * -----	9-18	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			F04D
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort Den Haag		Abschlußdatum der Recherche 29. September 2015	Prüfer Ingelbrecht, Peter
KATEGORIE DER GENANTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 15 00 1441

5

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.

Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

29-09-2015

10

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2013164146 A1	27-06-2013	CN 103185003 A	03-07-2013
		DK 2610693 T3	02-02-2015
		EP 2610693 A1	03-07-2013
		US 2013164146 A1	27-06-2013

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

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 102013007026 [0004]
- WO 2005088134 A1 [0005]