

19



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Économie

11

N° de publication :

LU502112

12

BREVET D'INVENTION**B1**

21

N° de dépôt: LU502112

51

Int. Cl.:

F04D 15/00, G01F 23/00

22

Date de dépôt: 18/05/2022

30

Priorité:

72

Inventeur(s):

FIEDLER Jens Olav – Allemagne, NOWAK Dirk –
Allemagne, GRAUROCK David – Allemagne

43

Date de mise à disposition du public: 01/12/2023

74

Mandataire(s):

COHAUSZ HANNIG BORKOWSKI WISSGOTT
Patentanwaltskanzlei GbR –
40237 Düsseldorf (Allemagne)

47

Date de délivrance: 01/12/2023

73

Titulaire(s):

WILO SE – 44263 Dortmund (Allemagne)

54

Verfahren zur Bestimmung der statischen Förderhöhe.

57

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der statischen Förderhöhe (H_{static}) eines in einem Arbeitspunkt (B) betriebenen drehzahlregelten Kreiselpumpenaggregats in einem offenen hydraulischen System. Dabei wird die Förderhöhe (H) des Kreiselpumpenaggregats im Arbeitspunkt (B) zum Erhalt einer Förderhöhenchwankung (ΔH) mit einer Anregungsfrequenz (f_g) moduliert, die derart niedrig ist, dass eine Förderstromschwankung (ΔQ) bewirkt wird, wobei aus der Förderhöhenchwankung (ΔH) und der Förderstromschwankung (ΔQ) Modulationsgrößen (H_0 , Q_0 , H_1 , Q_1) ermittelt werden, unter deren Verwendung die statische Förderhöhe (H_{static}) bestimmt wird. Die Erfindung betrifft ein drehzahlregelbares Kreiselpumpenaggregat mit einer Pumpenelektronik, die eingerichtet ist, das Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10 auszuführen.

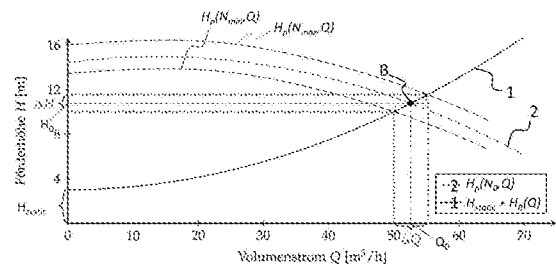


Fig. 4

WILO SE
Wilopark 1
44263 Dortmund

Verfahren zur Bestimmung der statischen Förderhöhe

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der statischen Förderhöhe eines drehzahlregulierten Kreiselpumpenaggregats in einem offenen hydraulischen System.

Wird eine Flüssigkeit von einem ersten Behälter in einen zweiten Behälter gepumpt, der gegenüber dem ersten Behälter höhergelegen ist, wird ein Teil des von der Kreiselpumpe aufgebrauchten Drucks für die Überwindung des Höhenunterschieds zwischen den Behältern benötigt, genauer gesagt für den Höhenunterschied zwischen dem Pegelstand des ersten Behälters (saugseitiges Flüssigkeitsniveau) und dem Pegelstand des zweiten Behälters (saugseitiges Flüssigkeitsniveau). Dieser Höhenunterschied wird als geodätische Höhe bezeichnet. Bei geschlossenen hydraulischen Systemen wie z.B. Heiz- oder Kühlkreisläufen ist die geodätische Höhe null. Erst wenn der Höhenunterschied überwunden ist, d.h. der von der Pumpe aufgebrauchte Differenzdruck Δp einer Förderhöhe H ($H = \Delta p / (\rho \cdot g)$) entspricht, die die geodätische Höhe übersteigt, ist der Förderstrom größer null.

Eine solche geodätische Höhe gibt es beispielsweise auch im Abwasserbereich, wenn Abwasser aus einem Pumpensumpf über eine Druckleitung in eine höher gelegene Abwasserleitung der Kanalisation eingeleitet werden soll. In diesem Fall ist die geodätische Höhe H_{geo} der Höhenunterschied zwischen dem Pegel im Pumpensumpf und der Höhe des Übergangs von der Druckleitung zur Abwasserleitung, wie dies beispielsweise in der deutschen Patentanmeldung DE 10 2014 006 828 A1 in Figur 1 gezeigt ist. Bei einer Bohrlochpumpe wäre die geodätische Höhe die Höhendifferenz vom Grundwasserspiegel bis zur Oberfläche.

Sind der erste und zweite Behälter geschlossen und besteht eine Druckdifferenz zwischen diesen, muss auch diese systembedingte Druckdifferenz von der Pumpe überwunden werden, damit sich ein Förderstrom größer null ergibt. Die Summe aus der geodätischen Höhe H_{geo} und der systembedingten Druckdifferenz zwischen der Druck- und Saugseite der Pumpe (die auch bei ausgeschalteter Pumpe vorliegt) bildet die statische Förderhöhe H_{static} . Dies bringt die folgende Gleichung zum Ausdruck:

$$(Gl. 1) \quad H_{static} = \frac{p_{out} - p_{in}}{\rho \cdot g} + H_{geo}$$

in der

H_{static} die statische Förderhöhe

p_{out} der druckseitige Druck/ Druck im zweiten Behälter

p_{in} der saugseitige Druck/ Druck im ersten Behälter

ρ die Dichte der geförderten Flüssigkeit

g die Schwerebeschleunigung ($9,81\text{m/s}^2$) und

H_{geo} die geodätische Höhe ist.

Die statische Förderhöhe H_{static} ist folglich diejenige Förderhöhe H des Kreiselpumpenaggregats, die überwunden werden muss, um überhaupt einen Förderstrom Q zu erhalten. Da sie von zumindest einem änderbaren Pegelstand abhängt, ist die statische Förderhöhe H_{static} ebenfalls veränderlich. So wird die statische Förderhöhe H_{static} größer, wenn der Pegel des ersten Behälters sinkt. Eine statische Förderhöhe gibt es auch in Trinkwasserversorgungsnetzwerken, die bereits mit einem Versorgungsdruck des Wasserversorgers gespeist werden. Hier kommen Booster-Pumpen (Druckerhöhungsanlagen) zum Einsatz, um den Versorgungsdruck zu erhöhen und einen ausreichenden Fließdruck an den höchsten und am weitesten entfernten Zapfstellen zu gewährleisten. Aufgrund des Versorgungsdrucks wirkt die statische Höhe hier, abhängig vom Messort, zunächst negativ. Ein Trinkwasserversorgungssystem ist ebenfalls ein offenes hydraulisches System, weil es zum Wasserversorger hin geöffnet ist und die Zapfstellen zur Atmosphäre geöffnet werden können. Ferner ist hier nicht vorgesehen, dauerhaft Wasser in einem geschlossenen Kreislauf zirkulieren zu lassen.

In der Darstellung der den Zusammenhang zwischen der Förderhöhe H und dem Förderstrom Q beschreibenden Anlagenkurve 1 des hydraulischen Systems im sogenannten HQ-Diagramm der Pumpe zeigt sich die statische Förderhöhe H_{static} ($Q=0$) als Verschiebung der Rohrnetzparabel ($Q>0$, strömungsabhängige Förderhöhe) auf der Druckachse des HQ-Diagramm nach oben, wie dies in Figur 1 gezeigt ist, oder im Falle eines vordruckbeaufschlagten Trinkwasserversorgungsnetzwerks nach unten. Die Rohrnetzparabel verläuft hier jeweils nicht durch den Ursprung.

Moderne Regelungen von Kreiselpumpenaggregaten erfordern für einen möglichst effizienten Pumpenbetrieb die genaue Kenntnis des Arbeitspunktes B der Kreiselpumpe, der im Schnittpunkt der bei der aktuellen Betriebsdrehzahl vorliegenden Pumpenkurve 2 mit der Anlagenkennlinie 1 liegt. Zur Bestimmung des Arbeitspunktes B in offenen hydraulischen Systemen ist aber nicht nur die Steigung der Rohrnetzparabel, d.h. der infolge sich ändernder Ventilstellungen im System veränderliche Rohrleitungswiderstand notwendig, sondern auch die statische Förderhöhe H_{static} , weil sie einen Teil der Anlagenkurve 1 bildet. Es ist deshalb erforderlich, die statische Förderhöhe H_{static} zu kennen. Dies ist unproblematisch, wenn sie aus Konstruktionsdaten der Anlage entnommen werden kann. Anderenfalls muss sie bestimmt werden.

Aus der europäischen Patentanmeldung EP 1 072 795 A1 ist bekannt, die gesamte Anlagenkurve abzufahren, indem die Drehzahl verändert und dabei der Förderstrom, die Förderhöhe und/ oder die Leistung messtechnisch ermittelt wird. Durch dieses Abfahren wird auch die statische Förderhöhe erkannt. Nachteilig ist hierbei die Notwendigkeit von Sensoren. Außerdem erfolgt die Bestimmung der Anlagenkurve nicht im laufenden Normalbetrieb, sondern in einem davon separaten Untersuchungsprozess, bei dem der Normalbetrieb verlassen bzw. ausgesetzt ist. Zur Bestimmung der statischen Förderhöhe wird folglich der für einen Normalbetrieb vorgesehene Arbeitspunkt des Kreiselpumpenaggregats verlassen.

Das europäische Patent EP 2 610 693 B1 beschreibt ein Verfahren zur Optimierung der Energieeffizienz eines Pumpensystems, das eine Systemidentifizierungsphase umfasst, bei der auch die sich ändernde statische Förderhöhe ermittelt wird. Hierzu

wird das Pumpensystem an die beiden Grenzfälle maximaler und minimaler Pegelstand herangefahren, um die minimale und maximale statische Förderhöhe zu ermitteln. Die Bestimmung der Anlagenkurve erfolgt also auch hier nicht im laufenden Normalbetrieb, sondern in einer diesem vorgelagerten Systemidentifizierungsphase. Zur Bestimmung der statischen Förderhöhe wird der Arbeitspunkt des Kreiselpumpenaggregats ebenfalls erheblich geändert.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, die genannten Nachteile zu überwinden und ein Verfahren sowie ein dieses ausführende Kreiselpumpenaggregat bereitzustellen, bei dem die Bestimmung der statischen Förderhöhe ohne Beeinträchtigung des laufenden Betriebs der Kreiselpumpe kontinuierlich im aktuellen Arbeitspunkt erfolgt, wobei insbesondere auf Sensoren für den Förderstrom und die Förderhöhe verzichtet werden soll.

Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 und eine Kreiselpumpe nach Anspruch 12 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen angegeben und werden nachfolgend erläutert.

Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass bei dem Verfahren zur Bestimmung der statischen Förderhöhe H_{static} eines in einem Arbeitspunkt B betriebenen drehzahlgeregelten Kreiselpumpenaggregats in einem offenen hydraulischen System, die Förderhöhe H des Kreiselpumpenaggregats in diesem Arbeitspunkt B zum Erhalt einer Förderhöhenschwankung ΔH mit einer Anregungsfrequenz f_g moduliert wird, die derart niedrig ist, dass eine Förderstromschwankung ΔQ , insbesondere ohne Phasenverschiebung zwischen dem Förderstrom (Q) und der Förderhöhe (H), bewirkt wird, wobei aus der Förderhöhenschwankung ΔH und der Förderstromschwankung ΔQ Modulationsgrößen H_0 , Q_0 , H_1 , Q_1 ermittelt werden, unter deren Verwendung die statische Förderhöhe H_{static} bestimmt wird.

Der besondere Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die statische Förderhöhe H_{static} im laufenden Normalbetrieb des Kreiselpumpenaggregats, in dem der aktuelle Arbeitspunkt B vorliegt, ermittelt werden kann. Vom Arbeitspunkt B wird im Mittel nicht abgewichen und es findet kein zum Normalbetrieb gesonderter Systemidentifikationsprozess statt.

Das Verfahren kann in allen offenen hydraulischen Systemen eingesetzt werden, wobei der Begriff „offen“ hier in dem Sinne zu verstehen ist, dass das hydraulische System keinen oder jedenfalls nicht nur einen in sich abgeschlossenen Kreislauf bildet, in dem eine reine Zirkulation des Fördermediums stattfindet. Es kann sich bei dem hydraulischen System beispielsweise um eine Bohrlochpumpe mit angeschlossener Druckleitung, um eine Abwasserhebeanlage mit angeschlossener Druckleitung, um ein Trinkwasserversorgungsnetzwerk oder um ein beliebiges anderes Rohrleitungsnetzwerk handeln, in dem die Kreiselpumpe fördert und das eine statische Förderhöhe hat, wie sie offenen hydraulischen Systemen immanent ist.

Die Modulation der Förderhöhe kann beispielsweise durch eine Modulation der Drehzahl $N(t)$ erreicht werden. Dies kann durch Beaufschlagung eines Sollwerts für die im Arbeitspunkt B vorliegende Betriebsdrehzahl N_0 mit einem periodischen Anregungssignal $F_g(t)$ einer Anregungsfrequenz f_g bewirkt werden:

$$(Gl. 2) \quad N(t) = N_0 + N_1 \cdot F_g(t).$$

Vorzugsweise handelt es sich bei dem Anregungssignal $F_g(t)$ um ein Sinussignal $F_g(t) = \sin(2\pi f_g \cdot t)$. Die Modulationsamplitude N_1 kann zwischen 1% bis 10% von der aktuellen Betriebsdrehzahl oder Nenndrehzahl der Pumpe oder zwischen 10 U/min und 100 U/min betragen.

Im Falle einer Drehmomentregelung ist es alternativ möglich, die Modulation der Förderhöhe durch Beaufschlagung des im Arbeitspunkt B vorliegenden Betriebsdrehmoments zu erreichen.

Die Anregungsfrequenz f_g ist so niedrig zu wählen, dass die geförderte oder zu fördernde Flüssigkeit trotz ihrer Massenträgheit der periodischen Schwankung folgen kann. Dies ist natürlich abhängig von der Massenträgheit bzw. dem insgesamt in Bewegung zu versetzenden Flüssigkeitsvolumen. Es hat sich gezeigt, dass bereits eine Anregungsfrequenz f_g kleiner als 1Hz in Fällen hydraulischer Systeme mit einem vergleichsweise geringen Flüssigkeitsvolumen geeignet ist. Vorzugsweise ist die

Anregungsfrequenz f_g kleiner 0,5Hz. Gleichzeitig sollte die Anregungsfrequenz f_g nicht zu klein sein, damit das System als quasi-stationär betrachtet werden kann, Änderungen des hydraulischen Systems, z.B. durch Öffnen oder Schließen von Zapfstellen, einen geringen Einfluss haben und die Erkennung nicht zu lang dauert. Es hat sich gezeigt, dass eine Anregungsfrequenz f_g oberhalb von 0,05 Hz, insbesondere bei ca. 0,1Hz ideal ist.

Bevorzugt erfolgt die Bestimmung der statischen Förderhöhe anhand einer die Anlagenkurve des hydraulischen Systems beschreibenden Gleichung, die die für einen bestimmten Förderstrom Q erforderliche Förderhöhe H angibt und einen quadratischen Term umfasst, dessen Koeffizient den hydraulischen Widerstand R des Systems angibt. Über die Anlagenkurve ist die Ermittlung der statischen Förderhöhe einfach möglich. Besonders einfach ist dies, wenn die Gleichung nur den quadratischen Term und einen förderstromunabhängigen Term, d.h. keinen linearen Term umfasst, der die statische Förderhöhe H_{static} angibt, da in diesem Fall kein weiterer Parameter ermittelt werden muss.

Zur Bestimmung des hydraulischen Widerstands R können zumindest einige der Modulationsgrößen verwendet werden.

Geeigneterweise sind die ermittelten Modulationsgrößen der jeweilige Gleichanteil H_0 , Q_0 der Förderhöhe H und des Förderstroms Q und die jeweilige Amplitude H_1 , Q_1 der Förderhöhen- und Förderstromschwankung ΔH und der Förderstromschwankung ΔQ .

Die Gleichanteile H_0 , Q_0 sind die Mittelwerte, um die die Förderhöhe H und den Förderstrom Q jeweils schwanken. So ist der Gleichanteil H_0 der Förderhöhe H die während des Verfahrens vorliegende mittlere Förderhöhe H . Ferner ist der Gleichanteil Q_0 des Förderstroms Q der während des Verfahrens vorliegende mittlere Förderstrom Q . Gemeinsam definieren die beiden Gleichanteile H_0 , Q_0 den Betriebspunkt im HQ -Diagramm.

Beispielsweise kann der Gleichanteil H_0 der Förderhöhe H durch Integration der Förderhöhe H über zumindest eine Periode bestimmt und/ oder der Gleichanteil Q_0 des Förderstroms Q durch Integration des Förderstroms Q über zumindest eine

Periode bestimmt werden. Die Gleichanteile bilden somit jeweils das arithmetische Mittel der Förderhöhe H bzw. des Förderstroms Q . Somit können die Gleichanteile H_0 , Q_0 mathematisch ausgedrückt wie folgt berechnet werden:

$$(Gl. 3) \quad H_0 = \int_0^T H(t) dt$$

$$(Gl. 4) \quad Q_0 = \int_0^T Q(t) dt$$

Eine kontinuierliche Bestimmung der für die Integration erforderlichen Förderhöhe $H(t)$ und des Förderstroms $Q(t)$ kann auf unterschiedliche Weise erfolgen, beispielsweise messtechnisch. So kann der Differenzdruck mittels eines oder zweier Sensoren gemessen und daraus die Förderhöhe bestimmt werden. Ferner kann ein Volumenstromsensor zur Messung des Förderstroms verwendet werden. Um ohne Sensoren auszukommen, kann die Bestimmung des Förderstroms und der Förderhöhe alternativ rein rechnerisch erfolgen.

Herzu kann beispielsweise das in der europäischen Patentanmeldung EP 3123033 A1 beschriebene Verfahren verwendet werden, das die hydraulische Impedanz des Systems ausnutzt, indem die Förderhöhe moduliert und aus der daraus folgenden Systemantwort, die sich beispielsweise in der Schwankung der elektrischen Leistungsaufnahme manifestiert, durch Auswertung zumindest eines Sinus-Integrals der Systemantwort, ähnlich einer Fourier-Transformation, der Förderstrom bestimmt wird. Hinsichtlich der Einzelheiten wird auf die EP 3123033 A1 verwiesen, deren Inhalt hiermit zum Inhalt der vorliegenden Offenbarung gemacht wird. Aus dem allgemein bekannten physikalisch-mathematischen Zusammenhang zwischen Förderstrom Q und Förderhöhe H am Pumpenaggregat kann dann die Förderhöhe H ermittelt werden, so dass der hydraulische Arbeitspunkt $B(Q, H)$ des Pumpenaggregats feststeht. Dieses Ermittlungsverfahren lässt sich besonders einfach und hervorragend mit dem erfindungsgemäßen Verfahren für die Bestimmung der statischen Förderhöhe kombinieren, wenn die dort verwendete Anregungsfrequenz größer, insbesondere um mehr als den Faktor 10 höher ist, als die bei dem erfindungsgemäßen Verfahren verwendete Frequenz. Beispielsweise kann die Anregungsfrequenz zur Bestimmung des Förderstroms zwischen 1Hz und 20Hz, vorzugsweise bei ca. 5 Hz liegen.

Gemäß einer weiteren Alternative können der Förderstrom und die Förderhöhe mit Hilfe eines modellbasierten Beobachters bestimmt werden. Ein solches Verfahren ist beispielsweise in der luxemburgischen Anmeldung LU501040 vom 17.12.2021 beschrieben.

Die Amplitude H_1 der Förderhöenschwankung ΔH und die Amplitude Q_1 der Förderstromschwankung ΔQ definieren die Schwankungsbreite der Förderhöhe H und des Förderstroms Q . Sie entsprechen mathematisch der Hälfte der Differenz zwischen dem Maximalwert und dem Minimalwert der Förderhöhe H bzw. des Förderstroms Q , so dass deren Berechnung einfach möglich ist.

Berücksichtigt man auch eine Phasenverschiebung φ_1 der Förderhöhen- bzw. Förderstromschwankung zum Anregungssignal (Drehzahlschwankung), die im Falle einer unzureichend kleinen Anregungsfrequenz vorhanden ist, können die Förderhöenschwankung ΔH und die Förderstromschwankung ΔQ als komplexwertige Wechselgröße

$$\underline{X}_1(t) = X_1 e^{j(2\pi f_g t + \varphi)} = X_1 [\cos(2\pi f_g t + \varphi) + j \sin(2\pi f_g t + \varphi)] \text{ betrachtet, wie folgt}$$

berechnet werden:

$$\underline{X}_1 = X_{1,\cos} + j X_{1,\sin} \text{ mit}$$

$$X_{1,\sin} = \int_0^T X(t) \cdot \sin(2\pi f_g t) dt \text{ und } X_{1,\cos} = \int_0^T X(t) \cdot \cos(2\pi f_g t) dt$$

$$\text{Die Amplitude } X_1 \text{ der Wechselgröße } \underline{X}_1 \text{ ist } X_1 = \sqrt{X_{1,\cos}^2 + X_{1,\sin}^2}$$

$$\text{und die Phase } \varphi_1 = \arctan \frac{X_{1,\sin}}{X_{1,\cos}}.$$

Liegt allerdings keine oder eine vernachlässigbar kleine Phasenverschiebung φ_1 vor, so kann/ können die Amplitude H_1 der Förderhöenschwankung ΔH direkt durch die Integration des Produkts aus der Förderhöhe H und einem Sinus- oder Cosinus-Signal mit der Anregungsfrequenz f_g über zumindest eine Periode bestimmt werden, und/ oder die Amplitude Q_1 der Förderstromschwankung ΔQ direkt durch Integration

des Produkts aus dem Förderstrom H und einem Sinus- oder Cosinus-Signal mit der Anregungsfrequenz f_g über zumindest eine Periode T bestimmt werden. Somit können die Amplituden H_1 , Q_1 mathematisch ausgedrückt wie folgt berechnet werden:

$$(Gl. 5) \quad H_1 = \int_0^T H(t) \cdot \sin(2\pi f_g t) dt$$

$$(Gl. 6) \quad Q_1 = \int_0^T Q(t) \cdot \sin(2\pi f_g t) dt$$

Unter Verwendung der Amplitude H_1 , Q_1 der Förderhöhenschwankung ΔH und der Förderstromschwankung ΔQ sowie des Gleichanteils Q_0 des Förderstroms Q kann dann der aktuelle hydraulische Widerstand R des Systems ermittelt werden. Der aktuelle hydraulische Widerstand R ist die Steigung der Anlagenkurve im vorliegenden Arbeitspunkt. Er kann anschließend für die Bestimmung der statischen Förderhöhe H_{static} anhand der die Anlagenkurve des hydraulischen Systems beschreibenden Gleichung verwendet werden.

Bevorzugt erfolgt die Ermittlung des hydraulischen Widerstands R des Systems gemäß der Gleichung

$$(Gl. 7) \quad R_h = \frac{H_1}{Q_1 \cdot 2Q_0}, \text{ in der}$$

R_h der hydraulische Widerstand,

H_1 die Amplitude der Förderhöhenschwankung ΔH ,

Q_1 die Amplitude der Förderstromschwankung ΔQ und

Q_0 der Gleichanteil des Förderstroms Q ist.

Die Bestimmung der statischen Förderhöhe H_{static} ist anhand der Anlagenkurve des hydraulischen Systems besonders einfach, da ihr prinzipieller Verlauf bekannt ist, und der Arbeitspunkt $B(H_0, Q_0)$, dessen Koordinaten den beiden zuvor genannten Gleichanteilen entsprechen, auf ihr liegt. Vorteilhafterweise kann als Anlagenkurve des Systems eine quadratische Gleichung in der Art $H = R \cdot Q^2 + H_{\text{static}}$ verwendet werden, weil diese die Physik mit guter Genauigkeit beschreibt und nur den Parameter R aufweist, der die Steigung der Anlagenkurve bzw. den zuvor

berechneten hydraulischen Widerstand beschreibt. Diese Anlagenkurve ermöglicht es also, die statische Förderhöhe H_{static} unter Verwendung der Gleichanteile H_0 , Q_0 der Förderhöhe H und des Förderstroms Q und des hydraulischen Widerstands des Systems zu ermitteln.

Dies kann derart erfolgen, dass die statischen Förderhöhe H_{static} gemäß der Gleichung

(Gl. 8) $H_{static} = H_0 - R_h \cdot Q_0^2$ bestimmt wird, in der

H_{static} die statische Förderhöhe,
 H_0 der Gleichanteil der Förderhöhe H ,
 Q_0 der Gleichanteil des Förderstroms Q und
 R_h der hydraulische Widerstand des Systems ist.

Die Erfindung betrifft des Weiteren ein drehzahlregelbares Kreiselpumpenaggregat umfassend eine Kreiselpumpe, einen diese antreibenden Elektromotor und eine Pumpenelektronik zur Steuerung und/ oder Regelung des Elektromotors, wobei die Pumpenelektronik eingerichtet ist, das erfindungsgemäße Verfahren auszuführen. Die Pumpenelektronik umfasst geeigneterweise einen Frequenzumrichter und eine Drehzahl- und/ oder Drehmomentregelung.

Weitere Merkmale, Eigenschaften, Wirkungen und Vorteile der Erfindung werden nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen und der beigefügten Figuren näher erläutert. Die in den Figuren enthaltenen Bezugszeichen behalten von Figur zu Figur ihre Bedeutung. In den Figuren bezeichnen Bezugszeichen stets dieselben oder äquivalente Komponenten, Bereiche, Richtungs- oder Ortsangaben.

Es sei darauf hingewiesen, dass im Rahmen der vorliegenden Beschreibung die Begriffe „aufweisen“, „umfassen“ oder „beinhalten“ keinesfalls das Vorhandensein weiterer Merkmale ausschließen. Ferner schließt die Verwendung des unbestimmten Artikels bei einem Gegenstand nicht dessen Plural aus. Es zeigen:

- Figur 1: HQ-Diagramm mit einer Pumpenkennlinie 2 und einer Anlagenkurve 1, die einen statischen Förderhöhenabfall H_{static} umfasst LU502112
- Figur 2: HQ-Diagramm gemäß Figur 1 mit einer gegenüber der Trägheit der geförderten Flüssigkeit schnellen Förderhöhenmodulation
- Figur 3: HQ-Diagramm gemäß Figur 1 mit einer gegenüber der Trägheit der geförderten Flüssigkeit langsamen Förderhöhenmodulation
- Figur 4: HQ-Diagramm mit einer Pumpenkennlinie 2 und einer Anlagenkurve 1, die einen statischen Förderhöhenabfall H_{static} umfasst, und Veranschaulichung einer Schwankung um den im Schnittpunkt der Kurven liegenden Betriebspunkt B der Kreiselpumpe
- Figur 5: Darstellung einer Drehzahlvariation mit Gleichanteil N_0 und Amplitude N_1 und der daraus resultierenden Förderstromschwankung ΔQ mit Gleichanteil Q_0 , der Amplitude Q_1 und der auf die Drehzahlanregung bezogene Phasenverschiebung φ_{Q_1} über der Zeit t
- Figur 6: ein Ablaufdiagramm des erfindungsgemäßen Verfahrens.

Figur 1 zeigt ein HQ-Diagramm mit einer Anlagenkurve 1 eines hydraulischen Systems mit einer positiven statischen Förderhöhe H_{static} . Die Anlagekurve 1 beschreibt den physikalischen Zusammenhang zwischen der Förderhöhe H und dem Förderstrom Q und gibt somit an, welche Förderhöhe H benötigt wird, respektive welchen zur Förderhöhe H proportionalen Differenzdruck Δp ein Kreiselpumpenaggregat in dem hydraulischen System aufbringen muss, um einen bestimmten Förderstrom Q zu erhalten. Die statische Förderhöhe H_{static} ist diejenige Förderhöhe, die mindestens erreicht werden muss, damit sich überhaupt ein Förderstrom größer null ergibt. Besteht kein originärer Druckunterschied zwischen der Saugseite und der Druckseite des Kreiselpumpenaggregats, entspricht die statische Förderhöhe der geodätischen Förderhöhe. Die Anlagenkurve 1 kann mathematisch vereinfacht durch die Gleichung $H(Q) = R_h \cdot Q^2 + H_{\text{static}}$ beschrieben werden.

In dem HQ-Diagramm von Figur 1 ist des Weiteren eine Pumpenkurve 2 eingezeichnet. Sie beschreibt für eine konstante Betriebsdrehzahl N_0 den physikalischen Zusammenhang zwischen der Förderhöhe H und dem Förderstrom Q am Kreiselpumpenaggregat. Der sich im Betrieb des Kreiselpumpenaggregats bei

der Betriebsdrehzahl N_0 einstellende Arbeitspunkt B liegt im Schnittpunkt der Pumpenkurve 2 mit der Anlagenkurve 1 d.h. der Kombination aus der geodätischen Höhe H_{static} und dem Förderhöhenabfall $H_R(Q) = R_h \cdot Q^2$, der durch den hydraulischen Widerstand R des Rohrnetzes bedingt ist (vgl. auch Figur 4).

Wird der Förderhöhe H im Arbeitspunkt B ein sinusförmiges Signal F_A aufgeprägt, dessen Anregungsfrequenz f_A derart hoch gewählt ist, dass das hydraulische System aufgrund der Massenträgheit der geförderten Flüssigkeit, beispielsweise Wasser, der damit bewirkten Förderhöhenmodulation nicht folgen kann, bleibt der Förderstrom Q im Wesentlichen konstant und es ergibt lediglich eine Förderhöhenschwankung ΔH . Der Arbeitspunkt B ändert sich daher für $Q \approx \text{constant}$ parallel zur Druckachse, d.h. vertikal. Es erfolgt also eine gegenüber der Trägheit der geförderten Flüssigkeit schnelle Förderhöhenmodulation. Dies ist in Figur 2 gezeigt. Eine solche Modulation kann verwendet werden, um den Förderstrom Q sensorlos zu bestimmen, wie dies in der europäischen Patentanmeldung EP 3123033 A1 beschrieben ist. Die Frequenz f_A (Anregungsfrequenz) kann zwischen 1Hz und 20 Hz, beispielsweise bei ca. 5Hz liegen.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Bestimmung der statischen Förderhöhe H_{static} wird demgegenüber der Förderhöhe H im Arbeitspunkt B ein anderes sinusförmiges Signal $F_g(t)$ aufgeprägt, dessen Frequenz f_g derart niedrig gewählt ist, dass das hydraulische System dieser Anregung ohne nennenswerte Phasenverschiebung folgen kann. In diesem Fall verlaufen die Arbeitspunkte B nicht mehr vertikal, sondern auf bzw. entlang der Rohrnetzparabel, wie dies Figur 3 veranschaulicht. Beispielsweise beträgt die Frequenz f_g dieses sinusförmigen Signals F_g zwischen $f_g = 1\text{Hz}$ und $0,05\text{Hz}$, beispielsweise ca. $0,1\text{Hz}$. Im letzteren Fall unterscheiden sich die Frequenzen $f_g = 0,1\text{Hz}$ und $f_A = 5\text{Hz}$ um den Faktor 50.

Die periodische Änderung der Förderhöhe H (Modulation) wird dadurch erreicht, dass im Rahmen der Drehzahlregelung des Kreiselpumpenaggregats der zur Erreichung des Arbeitspunktes B erforderlichen Soll Drehzahl N_0 das Anregungssignal $F_g(t)$ überlagert wird, so dass sich die Istdrehzahl $N(t)$ wie folgt darstellt:

$$(Gl. 9) \quad N(t) = N_0 + F_g(t) = N_0 + N_1 \sin(2\pi f_g \cdot t)$$

Das Anregungssignal $F_g(t)$ hat die o.g. Anregungsfrequenz f_g von beispielsweise 0,1 Hz und eine Anregungsamplitude N_1 von beispielsweise 10 bis 50 U/min. Die Istdrehzahl $N(t)$ schwankt dadurch zwischen einem Minimalwert $N_{\min} = N_0 - N_1$ und einem Maximalwert $N_{\max} = N_0 + N_1$, so dass sich die Pumpenkurve 2 hebt und senkt. Dies ist in Figur 4 veranschaulicht. Der Arbeitspunkt $B(H_0, Q_0)$ wandert dadurch entlang der Anlagenkurve 1 und es wird eine Förderhöenschwankung ΔH (Druckschwankung) einerseits und eine Förderstromschwankung ΔQ andererseits bewirkt.

Zur Verdeutlichung des zeitlichen Verlaufes 3 der niederfrequenten Drehzahlanregung und der daraus resultierenden Förderstromschwankung ΔQ wird der zeitliche Verlauf der Drehzahl $N(t)$ und der zeitliche Verlauf des Förderstroms $Q(t)$ in Figur 5 illustriert. Bei der Drehzahlvariation ist die Betriebsdrehzahl ein Gleichanteil, der der unmodulierten Solldrehzahl N_0 entspricht und der von der Anregungsamplitude N_1 überlagert wird. Der zeitliche Verlauf 4 der daraus resultierenden Förderstromschwankung ΔQ hat den Gleichanteil Q_0 , die Amplitude Q_1 und eine auf die Drehzahlanregung bezogene Phasenverschiebung φ_{Q1} . Analog zu dieser Förderstromschwankung ΔQ könnte auch die Förderhöenschwankung ΔH mit dem Gleichanteil H_0 , der Amplitude H_1 und der auf die Drehzahlanregung bezogenen Phasenverschiebung φ_{H1} in einem Diagramm dargestellt werden. Idealerweise wird die Drehzahlanregung derart niederfrequent gewählt, dass die Phasenverschiebung φ_{Q1} gleich null ist.

Aufgrund ihrer periodischen Schwankung sind die Förderhöhe und der Förderstrom nun Wechselgrößen. Ihr Wechselanteil, d.h. $\Delta Q = Q_1 \cdot \sin(2\pi f_g + \varphi_{Q1})$ und $\Delta H = H_1 \cdot \sin(2\pi f_g + \varphi_{H1})$ kann, wie in der Elektrotechnik üblich, als komplexe Zahl betrachtet werden, bestehend aus Realteil und Imaginärteil mit der imaginären Einheit j , und umfassend den Betrag Q_1 , H_1 und die Phase φ_{Q1} , φ_{H1} . Stellt man die Förderstromschwankung ΔQ und die Förderhöenschwankung ΔH jeweils als komplexe Zahl \underline{Q}_1 , \underline{H}_1 wie folgt dar:

$$(Gl. 10) \quad \underline{Q}_1 = Q_1(\cos(\varphi_{Q1}) + j\sin(\varphi_{Q1})) \text{ und}$$

$$(Gl. 11) \quad \underline{H}_1 = H_1(\cos(\varphi_{H1}) + j\sin(\varphi_{H1})),$$

kann für die hydraulische Anlage analog zu einer elektrischen Impedanz eine komplexwertige hydraulische Impedanz $\underline{Z}_h = Z_h(\cos(\varphi_{zh}) + j\sin(\varphi_{zh}))$ definiert werden, die durch den Quotienten aus Förderhöenschwankung ΔH und Förderstromschwankung ΔQ , genauer gesagt deren komplexen Amplituden \underline{H}_1 , \underline{Q}_1 gebildet ist:

$$(Gl. 12) \quad \underline{Z}_h = \frac{\underline{H}_1}{\underline{Q}_1} = Z_h(\cos(\varphi_{zh}) + j\sin(\varphi_{zh}))$$

Die hydraulische Impedanz beschreibt somit den Zusammenhang zwischen der anregungsbedingten Förderhöenamplitude H_1 und der resultierenden Förderstromamplitude Q_1 , welche sich in Abhängigkeit des differentiellen Widerstands R'_h und der hydraulischen Induktivität L_h des Systems bzw. Rohrnetzes sowie der Anregungsfrequenz f_g ergibt:

$$(Gl. 13) \quad \underline{Z}_h = \frac{\underline{H}_1}{\underline{Q}_1} = R'_h + j2\pi f_g L_h$$

Der differentielle Widerstand R'_h entspricht dem Realteil der hydraulischen Impedanz \underline{Z}_h und kann somit auch durch die Amplituden H_1 und Q_1 und die Phasenwinkel φ_{H1} und φ_{Q1} der Förderhöen- und Förderstromschwankung beschrieben und folgemäßig auch daraus berechnet werden:

$$(Gl. 14) \quad R'_h = Z_h \cos(\varphi_{zh}) = \frac{H_1}{Q_1} \cos(\varphi_{H1} - \varphi_{Q1})$$

Der differentielle Widerstand R'_h stellt den für den Arbeitspunkt B mit den Gleichanteilen Q_0 und H_0 des Förderstroms Q und der Förderhöhe H linearisierten Zusammenhang zwischen der Förderhöhe H und dem Förderstrom Q der Gleichung der Anlagenkurve 1 dar, welche den nicht differentiellen Widerstand R_h enthält: $H_0 =$

$R_h \cdot Q_0^2$. Somit ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen dem Widerstand R_h und dem differentiellen Widerstand R'_h :

$$(Gl. 15) \quad R'_h = 2 R_h Q_0 = \frac{H_1}{Q_1} \cos(\varphi_{H1} - \varphi_{Q1})$$

Somit kann bei Kenntnis des Gleichanteils Q_0 des Förderstroms Q anhand der Amplituden H_1 und Q_1 und der Phasenwinkel φ_{H1} und φ_{Q1} der Förderhöhe H und des Förderstroms Q der „normale“ Widerstand R_h berechnet werden:

$$(Gl. 16) \quad R_h = \frac{1}{2Q_0} \cdot \frac{H_1}{Q_1} \cos(\varphi_{H1} - \varphi_{Q1})$$

Da aufgrund der niederfrequenten Anregung mit der Frequenz f_g die Förderstrom- und Förderhöhenschwankung nahezu synchron sind ($\varphi_{H1} \approx \varphi_{Q1}$), ist der Ausdruck $\cos(\varphi_{H1} - \varphi_{Q1})$ in sehr guter Näherung gleich 1. Somit kann die vorstehende Berechnungsvorschrift für den hydraulischen Widerstand R_h vereinfacht werden zu

$$(Gl. 17) \quad R_h \approx \frac{H_1}{Q_1^2 Q_0}$$

Diese Vereinfachung ist auch deshalb von Vorteil, weil für eine exakte Berechnung des hydraulischen Widerstands R_h die Phasenwinkel φ_{H1} und φ_{Q1} benötigt werden würden. Sind diese jedoch infolge von Störeinflüssen leicht fehlerbehaftet, ergibt sich ein erheblicher Fehler bei dem Wert für den hydraulischen Widerstand R_h .

Nachdem der hydraulische Widerstand R_h des Systems bzw. Rohrnetzes anhand von Gleichung 16 oder 17 bestimmt wurde, kann die statische Förderhöhe H_{static} aufgrund der Anlagenkurve 1 unter Verwendung der Gleichanteile H_0, Q_0 für die Förderhöhe H und den Förderstrom Q , die das im Arbeitspunkt B vorliegende Wertepaar der Förderhöhe H und des Förderstroms Q bilden, wie folgt berechnet werden:

$$(Gl. 18) \quad H_{static} = H_0 - R_h \left(Q_0^2 + \frac{1}{2} Q_1^2 \right)$$

Für den Fall, dass die Amplitude Q_1 der Förderstromschwankung ΔQ sehr viel kleiner ist, als der im Arbeitspunkt B vorliegenden Förderstrom Q_0 , kann die vorstehende Gleichung weiter vereinfacht werden zu:

$$(Gl. 19) \quad H_{static} \approx H_0 - R_h Q_0^2$$

Vor dem Hintergrund der vorstehenden Ausführungen kann das erfindungsgemäße Verfahren zur Bestimmung der statischen Förderhöhe H_{static} durch folgende Verfahrensschritte gebildet sein, die in Figur 6 veranschaulicht sind:

S1: Erzeugung einer Förderhöhenmodulation

In einem ersten Schritt S1 erfolgt eine Modulation der Förderhöhe H des Kreiselpumpenaggregats im Arbeitspunkt B mit einer Anregungsfrequenz f_g zum Erhalt einer Förderhöhenschwankung ΔH , wobei die Anregungsfrequenz f_g derart gering ist, dass auch eine Förderstromschwankung ΔQ bewirkt wird. Vorzugsweise erfolgt die Modulation durch Beaufschlagung der im Arbeitspunkt B vorliegenden Solldrehzahl N_0 einer Drehzahlregelung mit einem Anregungssignal $F_g(t)$ mit der genannten Anregungsfrequenz f_g . Diese kann z.B. $f_g = 0,1\text{Hz}$ betragen. Im Falle einer Drehmomentregelung kann auch das einzustellende Soll-Drehmoment mit einem entsprechenden Anregungssignal beaufschlagt werden.

S2: Förderhöhen- und Förderstrombestimmung

In einem zweiten Schritt S2 erfolgt eine kontinuierliche Bestimmung der Förderhöhe H und des Förderstroms Q . Dies kann durch Messung mittels entsprechender Sensoren oder rechnerisch erfolgen.

Die rechnerische Ermittlung kann beispielsweise durch zusätzliche Modulation der Förderhöhe bzw. Drehzahl mit einem periodischen Anregungssignal erfolgen, dessen Anregungsfrequenz f_A mindestens um den Faktor 10 höher ist als die erstgenannte Anregungsfrequenz f_g , damit sich diese zweite Modulation aufgrund der Massenträgheit des geförderten Fluids nicht wesentlich auf den Förderstrom

auswirkt. Anschließend wird die Systemantwort ausgewertet, beispielsweise in Gestalt der elektrischen Leistungsaufnahme des Kreiselpumpenaggregats, indem daraus ein Sinus-Integral berechnet und aus dem Integralwert anhand einer Verknüpfung desselben, in Gestalt einer Tabelle oder Gleichung, mit dem Förderstrom, der Förderstrom Q berechnet wird, wie dies in der EP 3123033 A1 beschrieben ist. Die Förderhöhe H kann dann aus dem Förderstrom Q berechnet werden.

Die rechnerische Ermittlung kann alternativ anhand eines mathematischen Modells der Kreiselpumpe in dem hydraulischen System erfolgen, z.B. in Gestalt eines regelungstechnischen Beobachters, wie dies beispielsweise in der luxemburgischen Anmeldung LU501040 beschrieben ist.

S3: Amplitudenbestimmung

In einem dritten Schritt S3 werden die Amplitude Q_1 , H_1 der Förderhöenschwankung ΔH und der Förderstromschwankung ΔQ ermittelt. Die Amplituden Q_1 , H_1 bilden erste zu bestimmende Modulationsgrößen. Hierzu kann in einem ersten Teilschritt S3a die Amplitude Q_1 der Förderstromschwankung ΔQ durch Integration des Produkts aus dem ermittelten Förderstrom Q und einem Sinussignal mit der Anregungsfrequenz f_A über wenigstens eine Periode des Anregungssignals $F_A(t)$ bestimmt werden. In einem zweiten Teilschritt S3b kann in gleicher Weise die Amplitude H_1 der Förderhöenschwankung ΔH durch Integration des Produkts aus der ermittelten Förderhöhe H und einem Sinussignal mit der Anregungsfrequenz f_A über wenigstens eine Periode des Anregungssignals $F_A(t)$ bestimmt werden. Die beiden Teilschritte S3a, S3b können auch vertauscht werden.

S4: Arbeitspunktbestimmung

In einem vierten Schritt S4 werden die Gleichanteile Q_0 , H_0 der Förderhöhe H und des Förderstroms Q ermittelt. Die Gleichanteile Q_0 , H_0 bilden zweite zu bestimmende Modulationsgrößen. Sie sind im HQ Diagramm das den Arbeitspunkt B auf der Anlagekurve 1 definierende Wertepaar, so dass mit der Berechnung der Gleichanteile Q_0 , H_0 der Arbeitspunkt bestimmt ist. Hierzu kann in einem ersten Teilschritt S4a der Gleichanteil Q_0 des Förderstroms Q durch Integration des ermittelten Förderstroms Q über wenigstens eine Periode des Anregungssignals $F_A(t)$

bestimmt werden. In einem zweiten Teilschritt S4b kann in gleicher Weise der Gleichanteil H_0 der Förderhöhe H durch Integration der ermittelten Förderhöhe H über wenigstens eine Periode des Anregungssignals $F_A(t)$ bestimmt werden. Die beiden Teilschritte S4a, S4b können auch vertauscht werden.

Die Schritte S3 und S4 können auch in umgekehrter Reihenfolge ausgeführt werden.

S5: Widerstandsbestimmung

In einem fünften Schritt S5 wird der aktuelle hydraulische Widerstand R_h des Systems bzw. Rohrnetzes, ermittelt. Dies erfolgt unter Verwendung der ermittelten Amplituden Q_1 , H_1 der Förderhöenschwankung ΔH und der Förderstromschwankung ΔQ sowie des ermittelten Gleichanteils Q_0 des Förderstroms Q durch Auswertung der o.g. Gleichung 17, sofern die Anregungsfrequenz derart niedrig ist, dass die Förderhöenschwankung ΔH und die Förderstromschwankung ΔQ in Phase sind.

Falls dies nicht der Fall ist, kann zusätzlich die Phasenlage φ_{H1} und/ oder φ_{Q1} wie folgt bestimmt werden:

$$H_{1,\sin} = \int_0^T H(t) \cdot \sin(2\pi f_g) dt$$

$$H_{1,\cos} = \int_0^T H(t) \cdot \cos(2\pi f_g) dt$$

$$Q_{1,\sin} = \int_0^T Q(t) \cdot \sin(2\pi f_g) dt$$

$$Q_{1,\cos} = \int_0^T Q(t) \cdot \cos(2\pi f_g) dt$$

wobei gilt:

$$\varphi_{H1} = \arctan\left(\frac{H_{1,\cos}}{H_{1,\sin}}\right)$$

$$\varphi_{Q1} = \arctan\left(\frac{Q_{1,\cos}}{Q_{1,\sin}}\right)$$

Man beachte, dass hier der $H_{1,\sin}$ bzw. $Q_{1,\sin}$ Term im Nenner steht, da die Anregung als Sinusfunktion definiert wurde. Mit Hilfe der Phasenlage und Gleichung 16 kann dann der Widerstand R_h berechnet werden.

S6: Bestimmung der statischen Förderhöhe

In einem sechsten Schritt S6 wird schließlich die gesuchte statische Förderhöhe H_{static} ermittelt. Dies erfolgt zumindest unter Verwendung der ermittelten Gleichanteile Q_0 , H_0 der Förderhöhenchwankung ΔH und der Förderstromschwankung ΔQ , also des Arbeitspunktes B, sowie unter Verwendung des ermittelten hydraulischen Widerstands R_h durch Auswertung einer der o.g. Gleichungen 18 oder 19, vorzugsweise von Gleichung 19. Soll die Bestimmung der statischen Förderhöhe H_{static} anhand von Gleichung 18 erfolgen, wird zusätzlich zu den genannten Größen noch die Amplitude Q_1 der Förderstromschwankung ΔQ verwendet.

Das beschriebene Verfahren wird von dem Kreiselpumpenaggregat ausgeführt, in dessen Pumpenelektronik es implementiert ist. Hierzu weist die Pumpenelektronik wenigstens einen Prozessor und einen programmierbaren, nichtflüchtigen Speicherbaustein auf, in dem ein Steuerprogramm mit Instruktionen gespeichert ist, deren Ausführung auf dem Prozessor die Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens in der Pumpenelektronik und damit in dem Kreiselpumpenaggregat bewirken.

Die Pumpenelektronik umfasst

- erste Mittel zur Erzeugung einer Förderhöhenmodulation, die insbesondere zur Ausführung des Schritts S1 ausgebildet sind.
- zweite Mittel zur Bestimmung der Förderhöhe und des Förderstroms, die insbesondere zur Ausführung des Schritts S2 ausgebildet sind.
- dritte Mittel zur Bestimmung der Amplituden der Förderhöhen- und Förderstromschwankung, die insbesondere zur Ausführung des Schritts S3 ausgebildet sind.
- vierte Mittel zur Bestimmung des aktuellen Arbeitspunktes des Kreiselpumpenaggregats, die insbesondere zur Ausführung des Schritts S4 ausgebildet sind.
- fünfte Mittel zur Bestimmung des aktuellen hydraulischen Widerstands R_h des Systems bzw. Rohrnetzes, die insbesondere zur Ausführung des Schritts S5 ausgebildet sind, und

- sechste Mittel zur Ermittlung der gesuchten statischen Förderhöhe H_{static} des Systems, die insbesondere zur Ausführung des Schritts S6 ausgebildet sind.

Die ersten Mittel zur Erzeugung der Förderhöhenmodulation wirken auf eine Drehzahlregelung oder Drehmomentregelung ein, die ebenfalls Teil der Pumpenelektronik ist, indem sie ihr einen sich mit der Anregungsfrequenz f_g ändernden Sollwert vorgeben, der dem Sollwert N_0 für den aktuellen Arbeitspunkt, der beispielsweise aus einer übergeordneten Kennlinienregelung stammen kann, überlagert wird. Die Drehzahlregelung oder Drehmomentregelung steuert zur Erreichung des modulierenden Sollwerts einen Frequenzumrichter, der ebenfalls Teil der Pumpenelektronik ist, um die entsprechende Drehzahl oder das entsprechende Drehmoment an dem Elektromotor einzustellen.

Die zweiten Mittel zur Bestimmung der Förderhöhe und des Förderstroms können prinzipiell eingerichtet sein, ein beliebiges Verfahren zur Arbeitspunktbestimmung auszuführen.

In einer Ausführungsvariante können die zweiten Mittel eine Auswertungs- und Verarbeitungseinheit umfassen, um die Messsignale von Sensoren zur Messung des Drucks oder Differenzdrucks und/ oder des Volumenstroms zu erfassen und zu verarbeiten. Hierzu kann die Auswertungs- und Verarbeitungseinheit in an sich bekannter Weise beispielsweise einen Verstärker, einen Analog/Digitalwandler, einen Arbeitsspeicher, einen Filter und/ oder einen Prozessor für die Signalverarbeitung, gegebenenfalls auch eine protokollbasierte Kommunikationsschnittstelle aufweisen, falls einer der Sensoren Messdaten mittels eines Kommunikationsprotokolls bereitstellt. In der Ausführungsvariante der Bestimmung der Förderhöhe und des Förderstroms durch eine Messung umfasst das Kreiselpumpenaggregat außerdem entsprechende Sensoren zur Messung des Drucks oder Differenzdrucks und/ oder des Förderstroms. Diese Sensoren können baulich in das Kreiselpumpenaggregat integriert sein, oder unabhängig davon sein und über eine entsprechende Kommunikationsverbindung, leitungsgebunden (Kabel) oder per Funk (z.B. Bluetooth, WLAN, ZigBee, RFID), mit der Pumpenelektronik, genauer gesagt, mit der Kommunikationsschnittstelle verbunden sein.

Alternativ zur vorgenannten Ausführungsvariante kann anstelle eines Sensors zur Volumenstrombestimmung, die elektrische Leistungsaufnahme ermittelt und der Volumenstrom hieraus bestimmt werden, beispielsweise durch Anwendung der Affinitätsgesetze oder durch einen Vergleich der aktuellen Leistungsaufnahme P mit einer zuvor ermittelten Tabelle von Leistungswerten oder durch Berechnung anhand einer Leistungskurve $P(Q,n)$, die zuvor ermittelt und als Formel in einem Speicher der zweiten Mittel abgespeichert sein kann.

In einer anderen Ausführungsvariante können die zweiten Mittel zur Bestimmung der Förderhöhe und des Förderstroms ebenfalls auf die Drehzahlregelung oder Drehmomentregelung einwirken und ihr ein weiteres, sich mit einer zweiten, gegenüber der ersten Anregungsfrequenz f_g höheren Anregungsfrequenz f_A änderndes Anregungssignal $F_A(t)$ vorgeben, das dem Sollwert N_0 für den aktuellen Arbeitspunkt zusätzlich überlagert wird. Die zweiten Mittel umfassen dann ferner eine Auswerteeinheit, die eingerichtet ist, aus der Systemantwort auf die Anregung mit der zweiten Frequenz den Förderstrom zu ermitteln, wie dies in der europäischen Patentanmeldung EP 3123033 A1 beschrieben ist. Die Auswerteeinheit ist dann außerdem eingerichtet, aus dem Förderstrom die Förderhöhe zu berechnen.

In einer anderen Ausführungsvariante können die zweiten Mittel zur Bestimmung der Förderhöhe und des Förderstroms einen regelungstechnischen Beobachter mit einem mathematischen Modell des Kreiselpumpenaggregats und des angeschlossenen hydraulischen Systems umfassen und eingerichtet sein, aus diesem Modell die Förderhöhe und den Förderstrom zu bestimmen, wie dies in der luxemburgischen Anmeldung LU501040 vom 17.12.2021 beschrieben ist.

Die dritten Mittel zur Bestimmung der Amplituden der Förderhöhen- und Förderstromschwankung umfassen insbesondere eine Integralbildungseinheit. Sie sind eingerichtet, einerseits das Produkt aus dem ermittelten Förderstrom Q und einem Sinussignal mit der Anregungsfrequenz f_A zu bilden und über wenigstens eine Periode des Anregungssignals $F_A(t)$ zu integrieren, und andererseits das Produkt aus der ermittelten Förderhöhe H und einem Sinussignal mit der Anregungsfrequenz f_A zu bilden und über wenigstens eine Periode des Anregungssignals $F_A(t)$ zu integrieren, um die Amplituden Q_1 , H_1 zu ermitteln.

Die vierten Mittel zur Bestimmung des aktuellen Arbeitspunktes des Kreiselpumpenaggregats sind eingerichtet, die Gleichanteile Q_0 , H_0 der Förderhöenschwankung ΔH und der Förderstromschwankung ΔQ zu ermitteln und umfassen hierzu eine zweite Integralbildungseinheit. Sie sind eingerichtet, einerseits den ermittelten Förderstrom Q über wenigstens eine Periode des Anregungssignals $F_A(t)$ zu integrieren, und andererseits die ermittelte Förderhöhe H über wenigstens eine Periode des Anregungssignals $F_A(t)$ zu integrieren, um die Gleichanteile Q_0 , H_0 zu ermitteln.

Die fünften Mittel zur Bestimmung des aktuellen hydraulischen Widerstands R_h umfassen eine erste Berechnungseinheit, in der die Gleichung Gl. 17 implementiert ist. Sie sind eingerichtet, die berechneten Werte der Amplituden H_1 , Q_1 und den Wert des Gleichanteils Q_0 des Förderstroms in die diese Gleichung einzusetzen und die Gleichung auszuwerten, um den hydraulischen Widerstands R_h zu ermitteln bzw. zu schätzen.

Die sechsten Mittel zur Ermittlung der statischen Förderhöhe H_{static} umfassen eine zweite Berechnungseinheit, in der die Gleichung Gl. 18 oder 19 implementiert ist. Sie sind eingerichtet, die berechneten Werte der Gleichanteile H_0 , Q_0 sowie des hydraulischen Widerstands R_h , im Falle der Verwendung von Gleichung 18 auch den Wert der Amplitude Q_1 der Förderstromschwankung in die entsprechende Gleichung 18 oder 19 einzusetzen und diese Gleichung auszuwerten, um die statische Förderhöhe H_{static} zu ermitteln bzw. zu schätzen.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann im laufenden Betrieb des Kreiselpumpenaggregats jederzeit aktiviert bzw. ausgeführt werden, um die statische Förderhöhe H_{static} zu ermitteln, beispielsweise durch eine manuelle Auslösung durch einen Installateur oder Wartungstechniker oder durch die Pumpe selbst.

Das Verfahren kann im laufenden Betrieb auch dauerhaft aktiv sein. Der aktuelle Arbeitspunkt muss für keinen dieser Fälle verlassen werden, so dass das Verfahren nach außen kaum merkbar ist und den Betrieb anderer Komponenten des Systems nicht beeinträchtigt.

Es sei darauf hingewiesen, dass die vorstehende Beschreibung lediglich beispielhaft LU502112 zum Zwecke der Veranschaulichung gegeben ist und den Schutzbereich der Erfindung keineswegs einschränkt. Merkmale der Erfindung, die als „kann“, „beispielhaft“, „bevorzugt“, „optional“, „ideal“, „vorteilhaft“, „gegebenenfalls“, „geeignet“ oder dergleichen angegeben sind, sind als rein fakultativ zu betrachten und schränken ebenfalls den Schutzbereich nicht ein, welcher ausschließlich durch die Ansprüche festgelegt ist. Soweit in der vorstehenden Beschreibung Elemente, Komponenten, Verfahrensschritte, Werte oder Informationen genannt sind, die bekannte, naheliegende oder vorhersehbare Äquivalente besitzen, werden diese Äquivalente von der Erfindung mit umfasst. Ebenso schließt die Erfindung jegliche Änderungen, Abwandlungen oder Modifikationen von Ausführungsbeispielen ein, die den Austausch, die Hinzunahme, die Änderung oder das Weglassen von Elementen, Komponenten, Verfahrensschritten, Werten oder Informationen zum Gegenstand haben, solange der erfindungsgemäße Grundgedanke erhalten bleibt, ungeachtet dessen, ob die Änderung, Abwandlung oder Modifikationen zu einer Verbesserung oder Verschlechterung einer Ausführungsform führt.

Obgleich die vorstehende Erfindungsbeschreibung eine Vielzahl körperlicher, unkörperlicher oder verfahrensgegenständlicher Merkmale in Bezug zu einem oder mehreren konkreten Ausführungsbeispiel(en) nennt, so können diese Merkmale auch isoliert von dem konkreten Ausführungsbeispiel verwendet werden, jedenfalls soweit sie nicht das zwingende Vorhandensein weiterer Merkmale erfordern. Umgekehrt können diese in Bezug zu einem oder mehreren konkreten Ausführungsbeispiel(en) genannten Merkmale beliebig miteinander sowie mit weiteren offenbarten oder nicht offenbarten Merkmalen von gezeigten oder nicht gezeigten Ausführungsbeispielen kombiniert werden, jedenfalls soweit sich die Merkmale nicht gegenseitig ausschließen oder zu technischen Unvereinbarkeiten führen.

Ansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung der statischen Förderhöhe (H_{static}) eines in einem Arbeitspunkt (B) betriebenen drehzahlgeregelten Kreiselpumpenaggregats in einem offenen hydraulischen System, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Förderhöhe (H) des Kreiselpumpenaggregats im Arbeitspunkt (B) zum Erhalt einer Förderhöhenschwankung (ΔH) mit einer Anregungsfrequenz (f_g) moduliert wird, die derart niedrig ist, dass eine Förderstromschwankung (ΔQ) bewirkt wird, wobei aus der Förderhöhenschwankung (ΔH) und der Förderstromschwankung (ΔQ) Modulationsgrößen (H_0 , Q_0 , H_1 , Q_1) ermittelt werden, unter deren Verwendung die statische Förderhöhe (H_{static}) bestimmt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Modulation der Förderhöhe (H) durch Beaufschlagung eines Sollwerts für die im Arbeitspunkt (B) vorliegende Betriebsdrehzahl (N_0) oder das im Arbeitspunkt (B) vorliegende Betriebsdrehmoment mit einem periodischen Anregungssignal ($F_g(t)$) einer Anregungsfrequenz (f_g) bewirkt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Anregungsfrequenz (f_g) kleiner als 1Hz ist, vorzugsweise zwischen 0,5Hz und 0,05 Hz liegt, insbesondere ca. 0,1Hz beträgt.
4. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Bestimmung der statischen Förderhöhe (H_{static}) anhand einer die Anlagenkurve (1) des hydraulischen Systems beschreibenden Gleichung erfolgt, die die für einen bestimmten Förderstrom (Q) erforderliche Förderhöhe (H) angibt und einen quadratischen Term umfasst, dessen Koeffizient den hydraulischen Widerstand (R) des Systems angibt.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Gleichung nur den quadratischen Term und einen förderstromunabhängigen Term umfasst, der die statische Förderhöhe (H_{static}) angibt.
6. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Modulationsgrößen (H_0 , Q_0 , H_1 , Q_1) der Gleichanteil (H_0 , Q_0) und die Amplitude (H_1 , Q_1) der Förderhöhe (H) und des Förderstroms (Q) sind.
7. Verfahren zumindest nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Gleichanteil (H_0) der Förderhöhe (H) durch Integration der Förderhöhe (H) über zumindest eine Periode bestimmt wird und/ oder der Gleichanteil (Q_0) des Förderstroms (Q) durch Integration des Förderstroms (Q) über zumindest eine Periode bestimmt wird.
8. Verfahren zumindest nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Amplitude (H_1) der Förderhöhenschwankung (ΔH) durch Integration des Produkts aus der Förderhöhe (H) und einem Sinus- oder Cosinus-Signal mit der Anregungsfrequenz (f_g) über zumindest eine Periode bestimmt wird und/ oder die Amplitude (Q_1) der Förderstromschwankung (ΔQ) durch Integration des Produkts aus des Förderstrom (H) und einem Sinus- oder Cosinus-Signal mit der Anregungsfrequenz (f_g) über zumindest eine Periode bestimmt wird.
9. Verfahren zumindest nach Anspruch 4 und 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** der hydraulische Widerstand (R) des Systems im Arbeitspunkt (B) unter Verwendung der Amplitude (H_1 , Q_1) der Förderhöhenschwankung (ΔH) und der Förderstromschwankung (ΔQ) und des Gleichanteils (Q_0) des Förderstroms (Q) ermittelt wird.
10. Verfahren zumindest nach Anspruch 4 und 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ermittlung des hydraulischen Widerstands (R) des Systems gemäß der Gleichung $R = \frac{H_1}{Q_1 \cdot 2Q_0}$ erfolgt, in der R der hydraulische Widerstand, H_1 die Amplitude der Förderhöhenschwankung (ΔH), Q_1 die Amplitude der

Förderstromschwankung (ΔQ) und Q_0 der Gleichanteil des Förderstroms (Q) ist.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8 und einem der Ansprüche 9 oder 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die statische Förderhöhe (H_{static}) unter Verwendung der Gleichanteile (H_0 , Q_0) der Förderhöhe (H) und des Förderstroms (Q) und des hydraulischen Widerstands des Systems ermittelt wird gemäß der Gleichung $H_{static} = H_0 - R \cdot Q_0^2$ bestimmt wird, in der H_{static} die statische Förderhöhe, H_0 der Gleichanteil der Förderhöhe (H), Q_0 der Gleichanteil des Förderstroms (Q) und R der hydraulische Widerstand des Systems ist.
12. Drehzahlregelbares Kreiselpumpenaggregat umfassend eine Kreiselpumpe, einen diese antreibenden Elektromotor und eine Pumpenelektronik zur Steuerung und/ oder Regelung des Elektromotors, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Pumpenelektronik eingerichtet ist, das Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10 auszuführen.

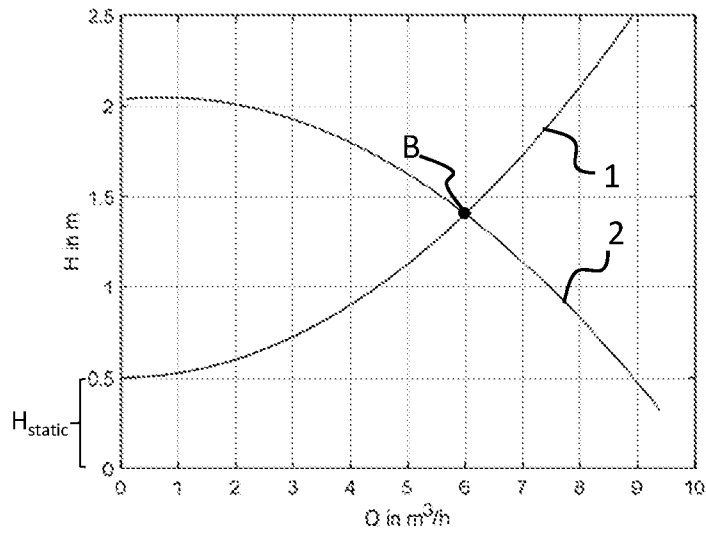


Fig. 1

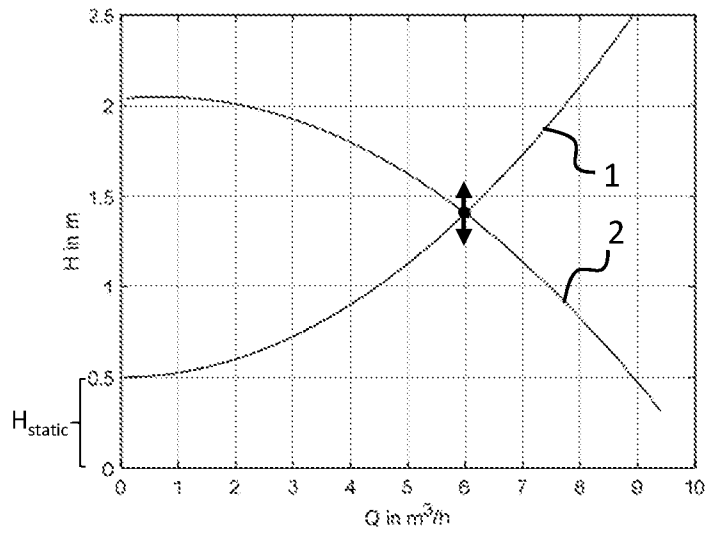


Fig. 2

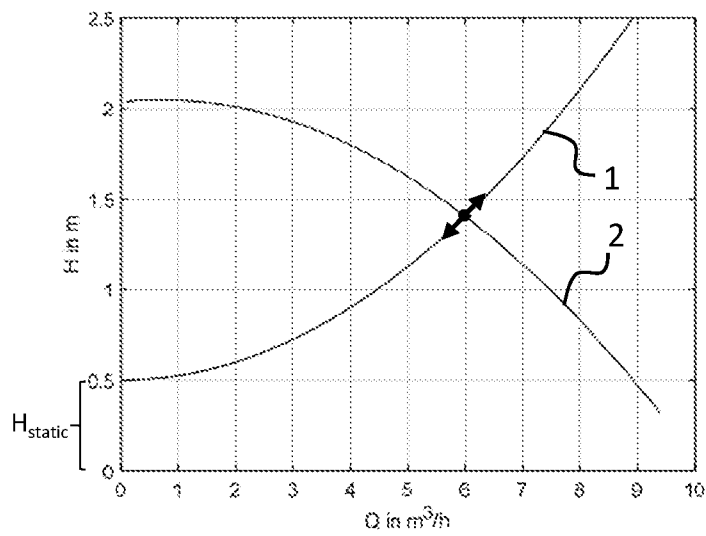


Fig. 3

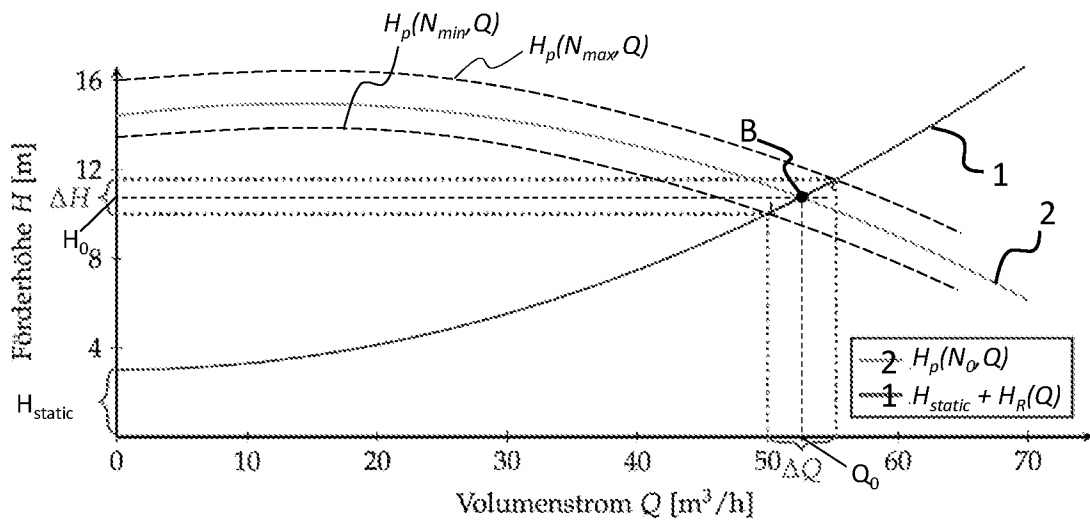


Fig. 4

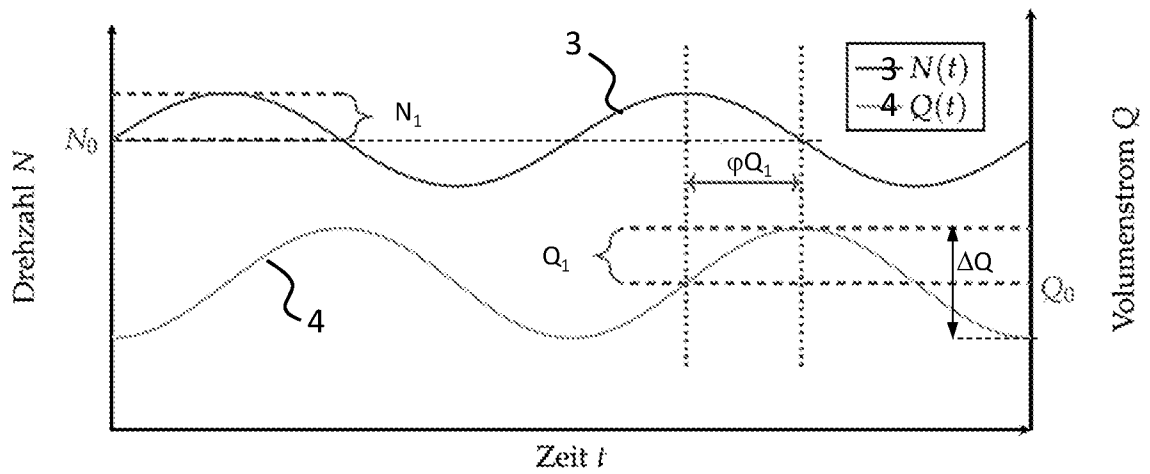


Fig. 5

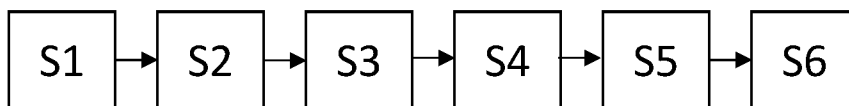


Fig. 6