

(19)



(11)

**EP 2 809 574 B1**

(12)

**EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:  
**23.03.2016 Patentblatt 2016/12**

(51) Int Cl.:  
**B63H 1/18 (2006.01) B63H 21/22 (2006.01)**  
**B63H 3/00 (2006.01)**

(21) Anmeldenummer: **13702427.9**

(86) Internationale Anmeldenummer:  
**PCT/EP2013/051636**

(22) Anmeldetag: **29.01.2013**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:  
**WO 2013/113681 (08.08.2013 Gazette 2013/32)**

(54) **VERFAHREN ZUM BETREIBEN EINES SCHIFFSPROPELLERS**

METHOD FOR THE OPERATION OF A MARINE PROPELLER

PROCÉDÉ PERMETTANT DE FAIRE FONCTIONNER UNE HÉLICE MARINE

(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**

(73) Patentinhaber: **Siemens Aktiengesellschaft 80333 München (DE)**

(30) Priorität: **02.02.2012 DE 102012201539**

(72) Erfinder: **HOFFMANN, Joachim 90559 Burgthann (DE)**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**10.12.2014 Patentblatt 2014/50**

(56) Entgegenhaltungen:  
**EP-A2- 2 355 539 US-A1- 2004 090 195**

**EP 2 809 574 B1**

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

## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Schiffspropellers.

**[0002]** Unter Kavitation versteht man im Allgemeinen die Bildung von Hohlräumen in einer Flüssigkeit. Im Falle der hydrodynamischen Kavitation wird diese Hohlraum-bildung durch eine strömungsbedingte Änderung des statischen Drucks in der Flüssigkeit verursacht.

**[0003]** Jedes durch Wasser bewegte Objekt ruft ab einer bestimmten Geschwindigkeit Kavitation hervor. Beim Betrieb eines Schiffspropellers, im Allgemeinen auch als "Schiffsschraube" bezeichnet, wird ab einer bestimmten Drehzahl Kavitation beobachtet. Kavitation stellt in den meisten Fällen ein Problem dar, da die daraus resultierenden Druckstöße im Wasser Korrosion und Erosion der Propellerblätter zur Folge haben können. Außerdem kann das Kavitationsgeräusch bei verschiedenen Anwendungen stören und zu betrieblichen Einschränkungen führen. So kann bei einem Einsatz eines propellergetriebenen Schiffes als Forschungsschiff das Kavitationsgeräusch Messungen im Wasser stören. Weiterhin kann dieses Geräusch Meerestiere stören, wodurch beispielsweise der Bewegungsradius von Kreuzfahrtschiffen oder Fähren eingeschränkt sein kann. Das Kavitationsgeräusch erlaubt auch eine akustische Ortung eines Schiffes, was z.B. bei einem Unterseeboot unerwünscht sein kann.

**[0004]** US 2004/0090195 wird als nächstliegender Stand der Technik gegenüber dem Gegenstand der Ansprüche 1 und 4 angesehen.

**[0005]** Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein verbessertes Verfahren zum Betreiben eines Schiffspropellers anzugeben.

**[0006]** Die Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren nach Anspruch 1 und eine Vorrichtung nach Anspruch 4.

**[0007]** Das erfindungsgemäße Verfahren zum Betreiben eines Schiffspropellers umfasst folgende Schritte: Detektieren eines durch Gaskavitation und/oder Pseudokavitation hervorgerufenen Rauschens an einem Festkörper durch einen Sensor; Übertragen eines Messsignals des Sensors durch ein kontaktloses Übertragungsverfahren von dem Sensor zu einer Signalverarbeitungseinheit, d.h. eine Auswerteeinheit; und Erzeugen von Steuerbefehlen zur Veränderung der Drehzahl des Propellers durch einen Antriebsmotor und/oder zur Veränderung des Blattanstellwinkels des Schiffspropellers durch einen Stellmotor. Die Steuerbefehle werden dabei durch die Signalverarbeitungseinheit erzeugt, und zwar in Abhängigkeit vom empfangenen Messsignal.

**[0008]** Die erfindungsgemäße Vorrichtung zum Betreiben eines Schiffspropellers umfasst eine Sensoreinheit, eine Signalübertragungseinheit und eine Signalverarbeitungseinheit. Der Sensor ist in der Lage, ein durch Gaskavitation und/oder Pseudokavitation hervorgerufenes Rauschen an einem Festkörper zu detektieren. Die Signalübertragungseinheit ist zur kontaktlosen Übertragung eines Messsignals von dem Sensor zu einer Signalver-

arbeitungseinheit geeignet. Die Signalverarbeitungseinheit ist zum Erzeugen von Steuerbefehlen an einen Antriebsmotor zur Veränderung der Propeller-Drehzahl und/oder an einen Stellmotor zur Veränderung des Blattanstellwinkels des Schiffspropellers geeignet, wobei die Steuerbefehle in Abhängigkeit vom empfangenen Messsignal generiert werden.

**[0009]** Die vorliegende Erfindung nutzt die Tatsache, dass bei der hydrodynamischen Kavitation in der Regel drei verschiedene Arten von Kavitation beobachtet werden: einerseits die als "harte Kavitation" oder "kaltes Sieden" bezeichnete Dampfkavitation, andererseits die unter dem Begriff "weiche Kavitation" zusammengefassten Arten der Gaskavitation und der Pseudokavitation; siehe z.B. Sauer, Jürgen: Instationär kavitierende Strömungen - Ein neues Modell, basierend auf Front Capturing (VoF) und Blasendynamik; Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), 2000, <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/3122000>.

**[0010]** Dampfkavitation beschreibt die Bildung dampfgefüllter Hohlräume (= Dampfblasen) aufgrund einer Abnahme des statischen Drucks der Flüssigkeit: Nach dem Gesetz von Bernoulli ist der statische Druck einer Flüssigkeit umso geringer, je höher die Geschwindigkeit der strömenden Flüssigkeit ist. Fällt der statische Druck der Flüssigkeit unter deren Verdampfungsdruck, bilden sich Dampfblasen. Die Dampfblasen werden anschließend meist mit der strömenden Flüssigkeit in Gebiete höheren Druckes mitgerissen. Überschreitet der statische Druck den Dampfdruck wieder, brechen die Dampfblasen explosionsartig, praktisch mit Schallgeschwindigkeit, zusammen. Durch einen zusammenstürzenden Hohlraum können sehr hohe Druckstöße entstehen. Daneben tritt beim Implodieren in der Regel ein Kavitationsgeräusch auf, da ein Teil der freiwerdenden Energie in Form von Schallwellen abgegeben wird.

**[0011]** Der Gaskavitation dagegen liegt ein anderes Phänomen zugrunde: Mit der Abnahme des statischen Drucks der Flüssigkeit verringert sich auch die Löslichkeit eines in der Flüssigkeit gelösten Gases, z.B. von Luft. Beim Übergang von gelöstem Gas durch Diffusion in den ungelösten Zustand bilden sich in der Flüssigkeit kleine gasgefüllte Hohlräume. Bei der Gaskavitation erfolgt also eine vom Sättigungsdruck abhängige Ausdiffusion der in der Flüssigkeit gelösten Gase.

**[0012]** Bei der Pseudokavitation, bei der es sich - wie bereits die Vorsilbe "pseudo" andeutet - im eigentlichen Sinne um keine "Bildung" von Hohlräumen in einer Flüssigkeit handelt, vergrößern in der Flüssigkeit bereits vorhandene, durch ihre mikroskopisch geringe Ausdehnung aber bisher unbemerkt gebliebene Gasbläschen aufgrund einer Abnahme des statischen Drucks der Flüssigkeit ihr Volumen. Die Pseudokavitation bezeichnet also keine "Bildung" von Hohlräumen, sondern eine "Aufweitung" von Gasblasen der in der Flüssigkeit ungelösten Gase infolge einer Druckabsenkung.

**[0013]** Nur bei völlig entgasten und gereinigten Flüssigkeiten füllen sich die Hohlräume ausschließlich mit

Dampf. In der Praxis, d.h. in realen Strömungen, tritt Kavitation in der Regel als eine Kombination von Gas-, Pseudo- und Dampf-Kavitation auf. Insbesondere treten die Gas- und die Dampf-kavitation in einer Mischform auf. Zunächst wachsen an den sogenannten Kavitationskeimen Blasen durch Gaskavitation und Pseudokavitation bis zu einem kritischen Radius an, mit dessen Erreichen und dem damit einhergehenden Unterschreiten der Dampfdruckkurve dann Dampf-kavitation einsetzt.

**[0014]** Obwohl alle drei genannten Kavitationsformen - Dampf-, Gas- und Pseudokavitation - praktisch gleichzeitig auftreten, haben sie eine sehr unterschiedliche Bedeutung in der Technik, z.B. für den Schiffsbetrieb.

**[0015]** Im Hinblick auf ihr Schädigungspotential gegenüber einem Werkstoff, z.B. einem Metall, aus welchem der Schiffspropeller hergestellt ist, ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der Gaskavitation, verglichen mit der Dampf-kavitation und der Pseudokavitation, um einen sehr langsamen Vorgang handelt. Bei der Gaskavitation erfolgt die erneute Lösung der Gasblasen in Bereichen höheren Druckes nicht schlagartig. Deshalb führt die Gaskavitation in der Regel zu keiner Werkstoffschädigung; die Gasblasen wirken sogar wie eine Art Dämpfer, der den hochfrequenten Schlägen der Dampf-kavitation entgegen wirkt, siehe Vortmann, Claas: Untersuchungen zur Thermodynamik des Phasenübergangs bei der numerischen Berechnung kavitierender Düsenströmungen; Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), 2001, <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/3202001>.

**[0016]** Ähnlich wie die Gaskavitation führt auch die Pseudokavitation in der Regel zu keiner Schädigung eines Schiffspropellers, da die gasgefüllten Hohlräume lediglich wachsen und schrumpfen, aber nicht implodieren.

**[0017]** Auch im Hinblick auf die Geräuschentwicklung unterscheidet sich die Dampf-kavitation erheblich von der Gas- und Pseudokavitation. Während die Druckstöße bei der Dampf-kavitation zu einer relativ starken Geräuschentwicklung, dem charakteristischen Kavitationsgeräusch führen, rufen die beiden anderen Kavitationsarten, die Gas- und die Pseudokavitation, lediglich ein relativ leises Rauschen hervor.

**[0018]** Dampf-kavitation und Gas-/Pseudokavitation unterscheiden sich in dem folgenden Punkt: Dampf-kavitation tritt nur auf, wenn der statische Druck die Siedelinie in Richtung von der flüssigen Phase zu der gasförmigen Phase überschreitet. Gas- und Pseudokavitation, und damit deren "Rauschen", tritt dagegen prinzipiell immer auf, wenn sich der Druck im Wasser ändert. Allerdings sind der Siedepunkt und die Gaslöslichkeit miteinander gekoppelt: In der Vorstufe zur Dampf-kavitation verringert sich die Gaslöslichkeit, so dass das gelöste Gas entmischt wird. Die Gaslöslichkeit wird kurz vor dem Erreichen des Siedepunkts so stark herabgesetzt, dass eine starke Blasenbildung einsetzt, und damit ein detektierbares Rauschen. Der Entmischungsprozess führt also zum Rauschen, das detektiert werden soll.

**[0019]** Die Erfindung erlaubt es somit, ein drohendes,

d.h. unmittelbar bevorstehendes Einsetzen der Dampf-kavitation zu detektieren. Somit können rechtzeitig Gegenmaßnahme ergriffen und die unvorteilhaften Begleiterscheinungen der Dampf-kavitation vermieden werden.

**[0020]** Dabei wird die Messung des durch die Gas- und/oder Pseudokavitation hervorgerufenen Rauschens nicht durch eine akustische oder Druckmessung in der den Schiffspropeller umgebenden flüssigen Phase durchgeführt, sondern durch ein Abgreifen akustischer Signale an einem Festkörper wie dem Propeller selbst, an einer Propellerwelle oder an einer den Schiffsrumpf betreffenden Schiffshaut, d.h. an einem Festkörper in der Umgebung der flüssigen Phase. Das durch die Gas- und/oder Pseudokavitation hervorgerufene Rauschen wird auf einem als akustischer Leiter wirkendem Festkörper, z.B. der Antriebswelle, akustisch gemessen; dabei werden Gas- und/oder Pseudokavitation durch eine Rotation des Schiffspropellers in der flüssigen Phase hervorgerufen.

**[0021]** Im Gefahrenfall, z.B. in der Nähe eines feindlichen Ortungsschiffes, muss ein Wasserfahrzeug, z.B. ein U-Boot, so schnell wie möglich den gegenwärtigen, eventuell bereits georteten Standort verlassen können, ohne Geräusche zu erzeugen, die eine Ortung des Wasserfahrzeugs ermöglichen. In einer solchen Situation bietet die Erfindung die Möglichkeit, die Geschwindigkeit des Wasserfahrzeugs, d.h. die Drehzahl des Schiffspropellers, unter Vermeidung von Dampf-kavitation und einem damit einhergehenden Kavitationsgeräusch zu optimieren.

**[0022]** Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen. Dabei kann das erfindungsgemäße Verfahren auch entsprechend den abhängigen Vorrichtungsansprüchen weitergebildet sein, und umgekehrt.

**[0023]** Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens ist der Festkörper der Schiffspropeller und/oder eine zum Antreiben des Schiffspropellers dienende Propellerwelle und/oder eine Schiffshaut.

**[0024]** Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens nutzt das kontaktlose Übertragungsverfahren elektromagnetische Wellen, vorzugsweise Radiowellen oder optische Wellen.

**[0025]** Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens kann die Sensoreinheit an einem Wasserfahrzeug angeordnet werden, insbesondere an dem Schiffspropeller und/oder an einer zum Antrieb des Propellers dienenden Antriebswelle und/oder an einem Rumpf des Wasserfahrzeugs.

**[0026]** Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens wird ein Sensor bereitgestellt, der zur Detektion eines durch Gaskavitation und/oder Pseudokavitation hervorgerufenen Rauschens in der Flüssigkeit geeignet ist, wird bei einer Detektion des besagten Rauschens ein Messsignal vom Sensor zu einer Signalverarbeitungseinheit gesendet, und erzeugt die Signalverarbeitungseinheit, ausgelöst durch einen Eingang des Messsignals, Daten, welche die Änderung mindestens

einer Betriebsgröße des Schiffspropellers betreffen.

**[0027]** Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens wird die besagte Detektion als ein Anzeiger für eine Änderung des statischen Druck in der Flüssigkeit genutzt.

**[0028]** Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens wird die besagte Detektion zur Ermittlung eines Wertebereichs genutzt wird, innerhalb dessen ein Gehalt eines in der Flüssigkeit gelösten Gases liegt.

**[0029]** Auf der Vorderseite der Propellerblätter entsteht ein Überdruck (Schub), während auf der Rückseite der Propellerblätter ein Unterdruck (Hub) auftritt. Der Begriff "Schiffspropeller" umfasst dabei alle Propeller, die zum Antrieb eines Wasserfahrzeugs dienen, z.B. eines Schiffes oder eines U-Boots. Im Fall des Betriebs eines Schiffspropellers dient das Rauschen der Gas- und Pseudokavitation als ein Hinweis dafür, dass sich der statische Druck der Flüssigkeit im Bereich des Propellers ändert. Insbesondere eine Verringerung des statischen Drucks ist dabei von Bedeutung, da dies ein bevorstehendes Einsetzen von Dampfkavitation bedeuten kann.

**[0030]** Wird das Rauschen detektiert und somit festgestellt, dass sich der statische Druck in der Flüssigkeit, insbesondere in dem das Wasserfahrzeug tragenden Wasser, verringert, kann beim Betrieb eines Schiffspropellers als eine mögliche Gegenmaßnahme die Drehzahl des Propellers verringert und/oder der Anstellwinkel zumindest eines Propellerblatts des Schiffspropellers verändert werden, um den Druck auf der Rückseite anzuheben und somit nicht in den Bereich der Dampfkavitation zu gelangen. Andere Maßnahmen zum Anheben des Drucks auf der Rückseite der Propellerblätter sind ein Einblasen von Wasser oder ein Öffnen von die Propellerblätter durchdringenden Kanälen, durch welche Wasser von der Überdruck- zur Unterdruckseite strömen kann.

**[0031]** Es ist möglich, dass bei der Anwendung des Verfahrens beim Betrieb eines Schiffspropellers ein Sensor bereitgestellt wird, der das besagte Rauschen an einer Propellerwelle detektieren kann, die dem Antrieb des Schiffspropellers dient. Die Propellerwelle ist mit dem Propeller mechanisch fest verbunden, um ihn in Rotation versetzen zu können. Der Sensor kontaktiert vorzugsweise die Propellerwelle. Es ist auch möglich, dass zumindest ein Teil des Sensors an der Welle befestigt ist.

**[0032]** Es ist möglich, dass bei der Anwendung des Verfahrens beim Betrieb eines Schiffspropellers ein Sensor bereitgestellt wird, der das besagte Rauschen an einem Schiffsrumpf detektieren kann. Der Schiffsrumpf bildet dabei die äußere Hülle des Wasserfahrzeugs, das mithilfe des Schiffspropellers bewegt wird. Der Sensor kontaktiert vorzugsweise den Schiffsrumpf. Es ist auch möglich, dass zumindest ein Teil des Sensors an dem Schiffsrumpf befestigt ist.

**[0033]** Es ist möglich, dass bei der Anwendung des Verfahrens beim Betrieb eines Schiffspropellers ein Sensor bereitgestellt wird, der das besagte Rauschen an dem Schiffspropeller detektieren kann. Der Sensor kon-

taktiert vorzugsweise den Propeller. Es ist auch möglich, dass zumindest ein Teil des Sensors an dem Propeller befestigt ist, z.B. an einem Propellerblatt.

**[0034]** Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung der Detektorvorrichtung ist die Sensoreinheit an einem Wasserfahrzeug angeordnet, insbesondere an einem Propeller und/oder an einer den Propeller antreibenden Welle und/oder an einem Rumpf des Wasserfahrzeugs.

**[0035]** Da die Kavitationsbildung neben dem statischen Druck  $p$  in der Flüssigkeit und der Temperatur  $T$  der Flüssigkeit auch von  $n$ , d.h. der Anzahl bzw. der Konzentration der gelösten Gase in der Flüssigkeit abhängig ist, lässt sich mit diesem Verfahren der Gehalt bzw. Sättigungszustand von in Flüssigkeiten gelösten Gasen ableiten. Der Propeller provoziert die Gaskavitation und/oder Pseudokavitation und das dadurch hervorgerufene Rauschen in der Flüssigkeit. Hierzu wird die Umdrehungsgeschwindigkeit des Propellers vorzugsweise langsam gesteigert, bis der Punkt erreicht wird, an dem sich dann das typische Rauschen detektieren lässt. Durch den Einbau eines Propellers in ein Kühl- oder Heizsystem, z.B. eine Kühl- oder Heizwasserleitung, kann somit das erfindungsgemäße Verfahren zur Bestimmung der Gaskavitation und/oder Pseudokavitation eingesetzt werden.

**[0036]** Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung umfasst diese Anwendung folgende weitere Schritte: Durchführen einer Kalibrierung, bei der zu verschiedenen Werten des Gehalts des in der Flüssigkeit gelösten Gases jeweils eine korrespondierende Grenzgeschwindigkeit ermittelt wird; und Speichern der korrespondierenden Wertepaare von Gasgehalt und Grenzgeschwindigkeit für einen nachfolgenden Schritt des besagten Ableitens. Durch den Schritt des Kalibrierens wird für unterschiedliche Gaskonzentrationen ermittelt, bei welcher Umdrehungsgeschwindigkeit des Propellers die Gas- und/oder Pseudokavitation und das dadurch hervorgerufene Rauschen in der Flüssigkeit auftritt. Die so ermittelten Wertepaare können, optional mit weiteren extra- bzw. interpolierten zusätzlichen Werten, in einer Speichereinheit gespeichert werden. Wird später für eine Flüssigkeit mit einem unbekanntem Gehalt an gelöstem Gas die Grenzgeschwindigkeit ermittelt, bei der die Gas- und/oder Pseudokavitation und das dadurch hervorgerufene Rauschen auftritt, so kann aus den abgespeicherten Wertepaaren der Wertebereich abgeleitet werden, in dem der Gehalt an gelöstem Gas liegt.

**[0037]** Es ist möglich, dass bei dieser Anwendung der Propeller in Intervallen betrieben wird oder nach Erreichen der Grenzgeschwindigkeit kontinuierlich bei dieser Grenzgeschwindigkeit betrieben wird. Man kann den Propeller kontinuierlich bei einer Grenzdrehungszahl permanent betreiben; überschreitet der Gasgehalt einen kritischen Grenzwert, kommt es zur Gas- und/oder Pseudokavitation und dem charakteristischen Rauschen.

**[0038]** Die oben beschriebenen Eigenschaften, Merkmale und Vorteile dieser Erfindung sowie die Art und Weise, wie diese erreicht werden, werden klarer und deutli-

cher verständlich im Zusammenhang mit der folgenden Beschreibung der Ausführungsbeispiele, die im Zusammenhang mit den Zeichnungen näher erläutert werden. Es zeigt jeweils schematisch und nicht maßstabsgetreu

Fig. 1 ein Phasendiagramm von Wasser;

Fig. 2 einen Schiffspropeller;

Fig. 3 eine Signalverarbeitungskette; und

Fig. 4 einen Regelkreis.

**[0039]** Fig. 1 zeigt ein p-T-Phasendiagramm von Wasser, in dem die drei verschiedenen Aggregatzustände fest S, flüssig L und gasförmig V durch als Linien gezeichnete Phasengrenzen voneinander getrennt sind. Die Linie zwischen dem Tripelpunkt  $T_3$  und dem kritischen Punkt C, d.h. die Phasengrenze zwischen flüssig L und gasförmig V, bildet die für die Dampfkavitation bedeutende Siedepunktskurve SPK.

**[0040]** Ausgehend von einem ersten Zustandspunkt P1 wird der statische Druck p in der Flüssigkeit erniedrigt, z.B. infolge einer Rotation einer Schiffsschraube. Wenn der statische Druck p soweit absinkt, dass er die Siedepunktskurve SPK am zweiten Zustandspunkt P2 erreicht, setzt Dampfkavitation ein, die auch bei einem weiteren Abfall des Drucks p, z.B. bis hin zum dritten Zustandspunkt P3, bestehen bleibt.

**[0041]** Bereits bei einer Druckänderung im flüssigen Phasenbereich L zwischen dem ersten Zustandspunkt P1 und dem zweiten Zustandspunkt P2 kommt es zu Gaskavitation und/oder Pseudokavitation, mit einem entsprechenden Rauschen. Je weiter der Druck p im flüssigen Phasenbereich L entlang der Strecke P1-P2 sich der Siedepunktskurve SPK annähert, desto deutlicher wird das durch Gaskavitation und/oder Pseudokavitation hervorgerufene Rauschen.

**[0042]** Um die schädlichen Begleiterscheinungen der Dampfkavitation, wie Korrosion und laute Implosionsgeräusche, zu vermeiden, besteht z.B. beim Betrieb einer Schiffsschraube das Bestreben, ein Absinken des statischen Drucks p im Wasser unterhalb des Siededrucks SPK zu vermeiden, d.h. Zustände entlang der gestrichelt gezeichneten Strecke P2-P3.

**[0043]** Fig. 2 zeigt eine Draufsicht auf einen Schiffspropeller 1, der eine Propellernabe 2 und mehrere daran befestigte Propellerblätter 3 umfasst. Der Propeller 1 mit den Propellerblättern 3 wird beim Betrieb des Propellers 1 im Wasser 5 durch eine Welle 4 zur Rotation gebracht. Die Welle 4 ragt durch eine mit einer Dichtung 10 gegen ein Eindringen von Wasser 5 abgedichtete Öffnung in einer Schiffshaut 8 in das Innere 9 eines Schiffsrumpfes hinein, wo sie von einem Antriebsmotor in Drehung versetzt werden kann.

**[0044]** Jede Bewegung der Blätter 3 im Wasser 5 ruft Änderungen des statischen Drucks im Wasser 5 hervor. Allerdings werden diese Druckänderungen erst ab einer

bestimmten Geschwindigkeit so groß, dass Dampfkavitation auftritt. Im Gegensatz dazu treten bereits bei kleinen Druckänderungen im Wasser 5 die Kavitationsarten der Gas- und der Pseudokavitation auf, durch welche mit Gas, insbesondere Luft, gefüllte Blasen 6 im Wasser 5 erzeugt werden. Beim Betrieb des Propellers 1 wachsen und schrumpfen diese der Gas- und der Pseudokavitation zugeordnete Luftblasen 6 fortwährend. Ein dadurch hervorgerufenen Rauschen breitet sich in Form von Schallwellen 7 durch das Wasser 5 aus.

**[0045]** Die von den Blasen 6 ausgehenden Schallwellen 7 erreichen einen auf einem Propellerblatt 3 angeordneten Drucksensor 11b. Die Schallwellen 7 treffen auch auf die Schiffshaut 8 und regen diese zu Schwingungen an. Diese Schwingungen können durch einen Schwingungssensor 11c, der mit der Schiffshaut 8 in Kontakt steht, detektiert werden. Außerdem treffen die Schallwellen 7 auf den Propeller 1 und regen diesen zu Schwingungen an. Über die feste Verbindung des Propellers 1 mit der Welle 4 sind diese Schwingungen auch durch einen Schwingungssensor 11c detektierbar, der mit der Welle 4 in Kontakt steht.

**[0046]** Fig. 3 zeigt eine Signalverarbeitungskette, bestehend aus einem Sensor 11, einer Signalverarbeitungseinheit 12 und einer Steuereinheit 13. Der Sensor 11 ist einer der in Fig. 2 dargestellten Sensoren 11a, 11b und 11c. Wenn der Sensor 11 ein Rauschen detektiert, das durch der Gas- und der Pseudokavitation zugeordnete Luftblasen 6 hervorgerufen wird, sendet er ein entsprechendes Messsignal 14 zu der Signalverarbeitungseinheit 12. Es ist möglich, dass der Sensor 11 erst ein Messsignal 14 zu der Signalverarbeitungseinheit 12 sendet, wenn der Schalldruckpegel des Rauschens einen vorgegebenen Schwellwert überschreitet. Es ist aber auch möglich, dass der Sensor 11 unabhängig vom Schalldruckpegel des Rauschens Messsignale 14 erzeugt, die er zu der Signalverarbeitungseinheit 12 sendet. In diesem Fall kann eine Auswertung bzw. Filterung der Messsignale 14 durch die Signalverarbeitungseinheit 12 erfolgen.

**[0047]** Die Signalübertragung von dem Sensor 11 zu der Signalverarbeitungseinheit 12 erfolgt vorzugsweise leitungsgebunden, z.B. über einen Leitungsdraht, da eine drahtlose Übertragung mittels elektromagnetischer Wellen im Wasser einer relativ hohen Schwächung durch Absorption unterliegen kann. Falls der Sensor auf dem rotierenden Propeller angeordnet ist, kann die elektrische Verbindung mithilfe von z.B. in der Propellernabe angeordneten Schleifkontakten aufrechterhalten werden.

**[0048]** Falls die Signalverarbeitungseinheit 12 ein Messsignal 14 empfängt, das einem Rauschen mit einem Mindest-Schalldruckpegel entspricht, generiert sie Daten 15, welche eine Änderung des statischen Drucks in der Flüssigkeit betreffen. Die Daten 15 können in Form einer flag-Variable vorliegen, welche einfach angibt, ob ein Rauschen detektiert wurde. Alternativ oder zusätzlich können die Daten 15 Information über einen Schallpegel,

eine Schwingungsform, eine Frequenz und andere Charakteristiken des Rauschens enthalten. Die Daten 15 können auch Ausgabedaten zur Ausgabe auf einem Ausgabegerät, z.B. einen Bildschirm oder einen Lautsprecher umfassen, um einen Nutzer über das detektierte Rauschen zu informieren.

**[0049]** Im vorliegenden Beispiel enthalten die von der Signalverarbeitungseinheit 12 generierten Daten 15 Eingangsdaten für eine Steuereinheit 13, welche entsprechend den Eingangsdaten z.B. bei einem die Welle 4 antreibenden Motor eine Drehzahlreduktion bzw. bei einer die Propellerblätter 3 ansteuernden Stellvorrichtung eine Änderung eines Anstellwinkels der Propellerblätter 3 veranlasst. Diese Maßnahmen zielen darauf ab, eine durch das Rauschen angezeigte Verringerung des statischen Drucks im Wasser 5 anzuhalten bzw. umzukehren, so dass ein Einsetzen der Dampfkavitation vermieden wird.

**[0050]** Fig. 4 zeigt als ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung einen Regelkreis zum Betreiben eines Schiffspropellers. In Feld 30 erfolgt eine Messung eines Schalldrucks oder einer Schwingung durch einen Sensor zur Detektion eines durch Gaskavitation und/oder Pseudokavitation hervorgerufenen Rauschens im Wasser. Bei dem Sensor 11 kann es sich um einen der in Fig. 2 dargestellten Sensoren 11a, 11b und 11c handeln.

**[0051]** In Feld 31 wird geprüft, ob der Sensor ein durch Gaskavitation und/oder Pseudokavitation hervorgerufenes Rauschen im Wasser detektiert hat. Eine Zuordnung eines gemessenen Geräuschs zu einer Gaskavitation und/oder Pseudokavitation kann z.B. anhand charakteristischer Eigenschaften des Messwertes, wie Frequenzen, Amplituden, Schwingungsform, etc. erfolgen. Auf diese Weise kann ein durch Gaskavitation und/oder Pseudokavitation hervorgerufenes Rauschen von anderen Geräuschen unterschieden werden.

**[0052]** Falls die Prüfung in Feld 31 ergibt, dass der Sensor ein durch Gaskavitation und/oder Pseudokavitation hervorgerufenes Rauschen im Wasser detektiert hat Y, wird in Feld 32 abgefragt, ob dieses Rauschen einen vorgegebenen Schwellwert überschreitet, z.B. anhand eines Schallpegels oder einer Schwingungsamplitude. Ist dies der Fall Y, so wird Feld 34 erreicht, in dem ein Steuersignal 35 generiert wird, z.B. ein an einen Motor zu sendender Befehl zur Reduzierung einer Drehzahl des Propellers oder ein an eine Stellvorrichtung zu sendender Befehl zur Verkleinerung eines Anstellwinkels der Propellerblätter. Da die große Lautstärke des Rauschens anzeigt, dass Gefahr besteht, in den Bereich der Dampfkavitation zu gelangen, muss durch diese Maßnahmen der statische Druck erhöht, und somit der Schub des Propellers erniedrigt werden. Parallel dazu wird über die Schleife 36 zu dem Feld 30 zurückgekehrt, so dass eine erneute Messung stattfinden kann.

**[0053]** Ergibt dagegen die Abfrage in Feld 32, dass das detektierte Rauschen den vorgegebenen Schwellwert nicht überschreitet N, so wird in Feld 33 ein Steu-

ersignal 37 generiert, z.B. ein an den Motor zu sendender Befehl zur Steigerung der Drehzahl des Propellers oder ein an die Stellvorrichtung zu sendender Befehl zur Vergrößerung des Anstellwinkels der Propellerblätter. Da die kleine Lautstärke des Rauschens anzeigt, dass noch keine Gefahr besteht, in den Bereich der Dampfkavitation zu gelangen, kann durch diese Maßnahmen der Schub des Propellers noch weiter erhöht und somit der statische Druck weiter erniedrigt werden. Parallel dazu wird über die Schleife 38 zu dem Feld 30 zurückgekehrt, so dass eine erneute Messung stattfinden kann.

**[0054]** Ergibt die Prüfung in Feld 31 andererseits, dass der Sensor kein durch Gaskavitation und/oder Pseudokavitation hervorgerufenes Rauschen im Wasser detektiert hat N, so kann direkt zu dem Feld 33 fortgeschritten werden.

**[0055]** Obwohl die Erfindung im Detail durch die bevorzugten Ausführungsbeispiele näher illustriert und beschrieben wurde, so ist die Erfindung nicht durch die offenbarten Beispiele eingeschränkt und andere Variationen können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Schutzzumfang der Erfindung zu verlassen.

## 25 Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Schiffspropellers (1), umfassend folgende Schritte:

- Detektieren, mittels eines Sensors (11), eines durch Gaskavitation und/oder Pseudokavitation hervorgerufenen Rauschens an einem Festkörper (1, 4, 8), wobei das durch die Gas- und/oder Pseudokavitation hervorgerufene Rauschen auf dem als akustischer Leiter wirkenden Festkörper akustisch gemessen wird;
- Übertragen eines Messsignals (14) des Sensors (11) durch ein kontaktloses Übertragungsverfahren von dem Sensor (11) zu einer Signalverarbeitungseinheit (12); und
- Erzeugen von Steuerbefehlen, durch die Signalverarbeitungseinheit (12) und in Abhängigkeit vom empfangenen Messsignal (14), zur Veränderung der Propeller-Drehzahl durch einen Antriebsmotor und/oder zur Veränderung des Blattanstellwinkels des Schiffspropellers (1) durch einen Stellmotor.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Festkörper (1, 4, 8) der Schiffspropeller (1) und/oder eine zum Antreiben des Schiffspropellers (1) dienende Propellerwelle (4) und/oder eine Schiffshaut (8) ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei das kontaktlose Übertragungsverfahren elektromagnetische Wellen, vorzugsweise im Radiobereich oder im optischen Bereich, nutzt.

4. Vorrichtung zum Betreiben eines Schiffspropellers (1), umfassend eine Sensoreinheit (11), eine Signalübertragungseinheit und eine Signalverarbeitungseinheit (12), wobei der Sensor (11) ein durch Gas- kavitation und/oder Pseudokavitation hervorgerufenes Rauschen an einem Festkörper (1, 4, 8) detektieren kann, **dadurch gekennzeichnet, daß** das durch die Gas- und/oder Pseudokavitation hervorgerufene Rauschen auf dem als akustischer Leiter wirkenden Festkörper akustisch gemessen wird, die Signalübertragungseinheit zur kontaktlosen Übertragung eines Messsignals (14) von dem Sensor (11) zu einer Signalverarbeitungseinheit (12) geeignet ist, und die Signalverarbeitungseinheit (12) in Abhängigkeit vom empfangenen Messsignal (14) zum Erzeugen von Steuerbefehlen an einen Antriebsmotor bzw. einen Stellmotor zur Veränderung der Propeller-Drehzahl und/oder des Blattanstellwinkels des Schiffspropellers (1) geeignet ist.
5. Vorrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Sensoreinheit (11) an einem Wasserfahrzeug angeordnet werden kann, insbesondere an dem Schiffspropeller (1) und/oder an einer zum Antrieb des Propellers (1) dienenden Welle (4) und/oder an einem Rumpf (8) des Wasserfahrzeugs.

## Claims

1. Method for the operation of a marine propeller (1), comprising the following steps:
- detection, by means of a sensor (11), of noise on a solid body (1, 4, 8) caused by gas cavitation and/or pseudocavitation, wherein the noise caused by the gas and/or pseudocavitation is measured acoustically on a solid body functioning as an acoustic conductor;
  - transmission of a measurement signal (14) of the sensor (11) by means of a contactless transmission method from the sensor (11) to a signal processing unit (12); and
  - generation of control commands by the signal processing unit (12) depending on the received measurement signal (14) to change the propeller speed by means of a drive motor and/or to change the angle of attack of the marine propeller (1) by means of an actuator.
2. Method according to claim 1, wherein the solid body (1, 4, 8) is the marine propeller (1) and/or a propeller shaft (4) used to drive the marine propeller (1) and/or a ship's plating (8).
3. Method according to claim 1 or 2, wherein the contactless transmission method uses electromagnetic

waves, preferably in the radio range or in the optical range.

4. Apparatus for the operation of a marine propeller (1), comprising a sensor unit (11), a signal transmission unit and a signal processing unit (12), wherein the sensor (11) is able to detect a noise on a solid body (1, 4, 8) caused by gas cavitation and/or pseudocavitation, **characterised in that** the noise caused by the gas and/or pseudocavitation is measured acoustically on a solid body functioning as an acoustic conductor, the signal transmission unit is suitable for the contactless transmission of a measurement signal (14) from the sensor (11) to a signal processing unit (12) and the signal processing unit (12) is suitable, depending on the received measurement signal (14), for the generation of control commands to a drive motor or an actuator to change the propeller speed and/or the angle of attack of the marine propeller (1).
5. Apparatus according to claim 4, **characterised in that** the sensor unit (11) can be arranged on a watercraft, in particular on the marine propeller (1) and/or on a shaft (4) used to drive the propeller (1) and/or on a hull (8) of the watercraft.

## Revendications

1. Procédé pour faire fonctionner une hélice ( 1 ) de bateau, comprenant les stades suivants :
- on détecte au moyen d'un capteur ( 11 ) un bruit provoqué par une cavitation de gaz et/ou une pseudo-cavitation sur un corps ( 1, 4, 8 ) solide, le bruit provoqué par la cavitation de gaz et/ou par la pseudo-cavitation étant mesuré acoustiquement sur le corps solide servant de conducteur acoustique ;
  - on transmet un signal ( 14 ) de mesure du capteur ( 11 ) par un procédé de transmission sans contact du capteur ( 11 ) à une unité ( 12 ) de traitement du signal ; et
  - on produit des instructions de commande par l'unité ( 12 ) de traitement du signal et en fonction du signal ( 14 ) de mesure reçu pour modifier la vitesse de rotation de l'hélice par un moteur d'entraînement et/ou pour modifier l'angle d'attaque de pale de l'hélice ( 1 ) du bateau par un moteur de réglage.
2. Procédé suivant la revendication 1, dans lequel le corps ( 1, 4, 8 ) solide est l'hélice ( 1 ) du bateau et/ou un arbre ( 4 ) d'hélice servant à entraîner l'hélice ( 4 ) du bateau et/ou un bordé ( 8 ) du bateau.
3. Procédé suivant la revendication 1 ou 2, dans lequel

le procédé de transmission sans contact utilise des ondes électromagnétiques, de préférence dans le domaine radio ou dans le domaine optique.

4. Dispositif pour faire fonctionner une hélice ( 1 ) de bateau, comprenant une unité ( 11 ) formant capteur, une unité de transmission du signal et une unité ( 12 ) de traitement du signal, le capteur ( 11 ) pouvant détecter sur un corps ( 1, 4, 8 ) solide un bruit provoqué par cavitation de gaz et/ou par pseudo-cavitation, **caractérisé en ce que** le bruit provoqué par cavitation de gaz et/ou par pseudo-cavitation est mesuré acoustiquement sur le corps solide servant de conducteur acoustique, l'unité de transmission du signal est propre à transmettre sans contact un signal ( 14 ) de mesure du capteur ( 11 ) à une unité ( 12 ) de traitement du signal et l'unité ( 12 ) de traitement du signal est propre en fonction du signal ( 14 ) de mesure reçu à produire des instructions de commande d'un moteur d'entraînement ou d'un moteur de réglage pour modifier la vitesse de rotation de l'hélice et/ou l'angle d'attaque de pale de l'hélice ( 1 ) du bateau.
5. Dispositif suivant la revendication 4, **caractérisé en ce que** l'unité ( 11 ) formant capteur peut être montée sur un bâtiment de navigation, notamment sur l'hélice ( 1 ) d'un bateau et/ou sur un arbre ( 4 ) servant à l'entraînement de l'hélice ( 1 ) et/ou sur la coque d'un bâtiment de navigation.

35

40

45

50

55

FIG 1

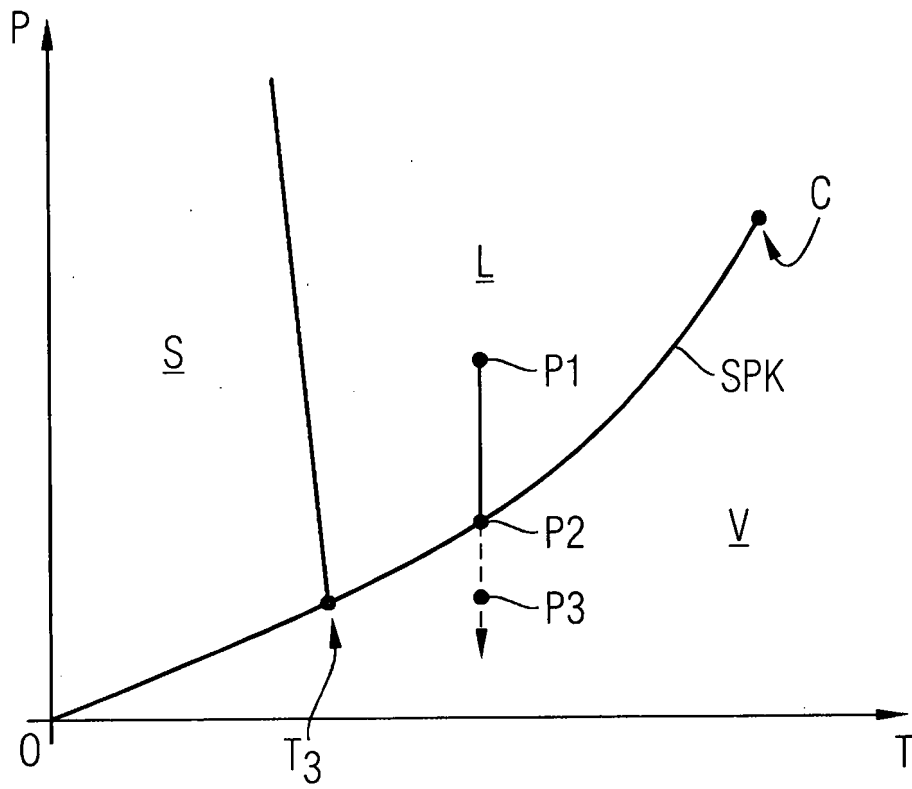


FIG 2

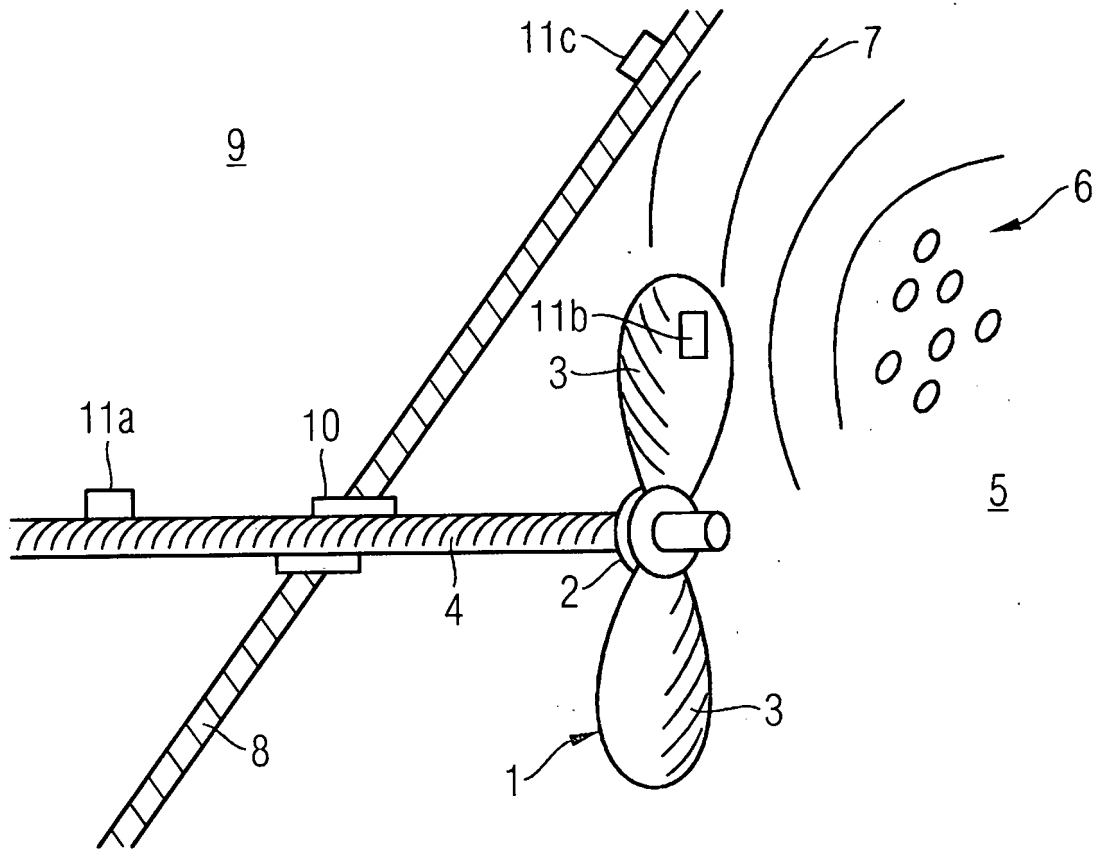


FIG 3

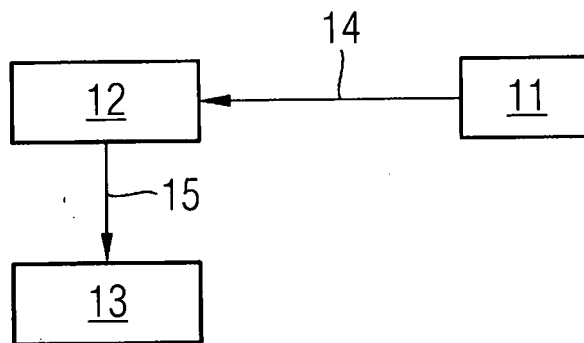
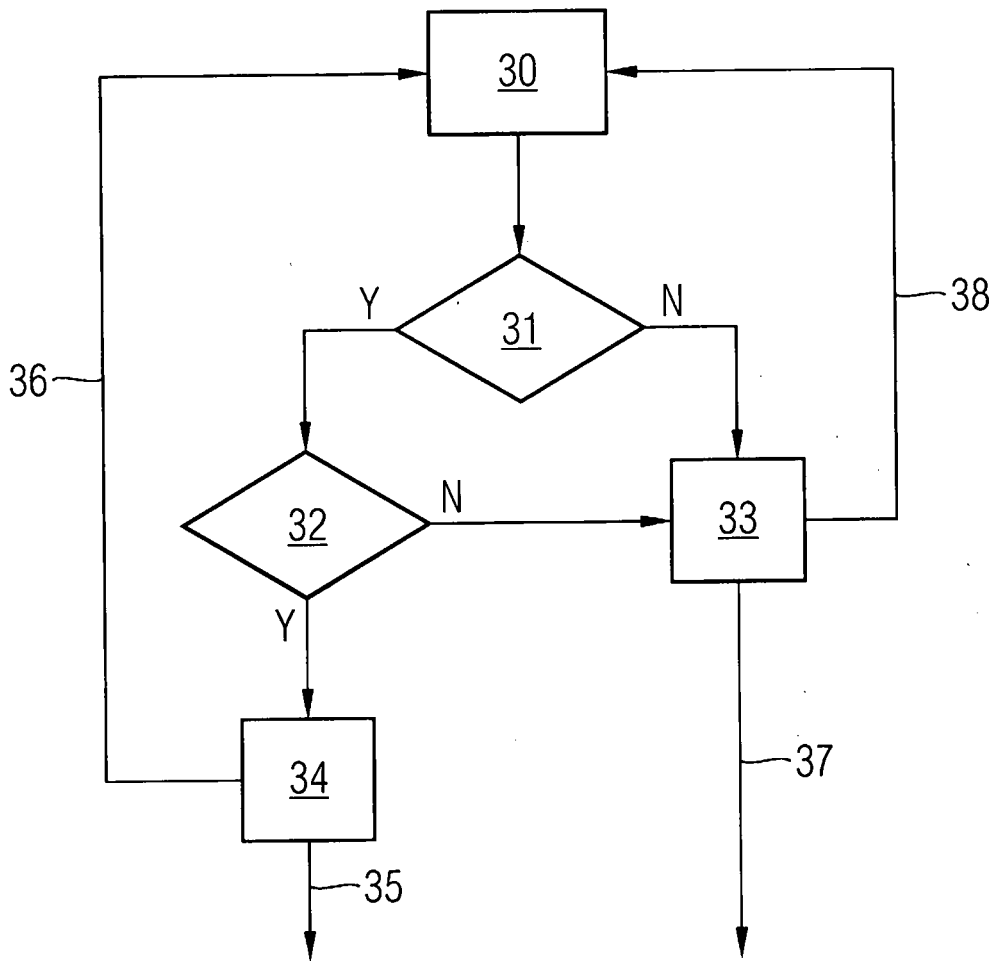


FIG 4



**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**

- US 20040090195 A [0004]