(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 2 039 939 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
09.08.2017 Patentblatt 2017/32

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

(21) Anmeldenummer: **07018530.1**

(22) Anmeldetag: **20.09.2007**

(54) **Verfahren zur Überwachung einer Energieumwandlungseinrichtung**

Method for monitoring an energy conversion device

Procédé de surveillance d'un dispositif de transformation d'énergie

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL PL PT RO SE SI SK TR

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
25.03.2009 Patentblatt 2009/13

(73) Patentinhaber: **Grundfos Management A/S**
8850 Bjerringbro (DK)

(72) Erfinder:
- **Vadstrup, Pierre**
  8200 Brabrand (DK)
- **Kallesøe, Carsten Skovmose**
  8800 Viborg (DK)

(74) Vertreter: **Vollmann, Heiko**
Vollmann & Hemmer
Patentanwälte
Wallstrasse 33a
23560 Lübeck (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A- 1 564 411
DE-A1- 19 618 462
DE-A1-102007 009 301
US-A1- 2005 251 362

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).

EP 2 039 939 B1

Printed by Jouve, 75001 PARIS (FR)

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Überwachung einer Energieumwandlungseinrichtung, die aus mehreren funktionell miteinander verknüpften Funktionseinheiten besteht. Solche Energieumwandlungseinrichtungen im Sinne der Erfindung können beispielsweise elektromotorisch angetriebene Kreiselpumpenaggregate, elektromotorisch angetriebene Kompressoren, damit bestückte Anlagen oder dergleichen sein. Sie bestehen aus mehreren funktionell miteinander verknüpften Funktionseinheiten, wie beispielsweise Elektromotor und Kreiselpumpe oder Elektromotor und Verdrängerpumpe oder Verbrennungsmotor und elektrischer Generator. Derartige Energieumwandlungseinrichtungen finden heutzutage in nahezu allen technischen, aber auch häuslichen Bereichen Anwendung.

[0002] Zwar ist man im Zuge der knapper werdenden Ressourcen stets bemüht, Maschinen, Anlagen oder sonstige Energieumwandlungseinrichtungen so aufzubauen, dass diese mit möglichst hohem Wirkungsgrad über lange Zeit arbeiten, doch stellt sich in der Praxis häufig das Problem, dass die anfänglich hohen Wirkungsgrade nachlassen und die Einrichtung weiterbetrieben wird, obwohl sie schon lange nicht mehr den gewünschten Wirkungsgrad aufweist. Dieses Phänomen ist beispielsweise bei Heizungsumwälzpumpen oder bei Kühlschränken zu beobachten. Ein Austausch erfolgt typischerweise nur dann, wenn ein Defekt offenkundig ist oder die Einrichtung den bestimmungsgemäßen Dienst vollständig versagt.

[0003] In vielen solcher Fälle wäre es jedoch wirtschaftlich sinnvoll, die Einrichtung vorher auszutauschen oder zumindest die defekte oder mangelhaft arbeitende Funktionseinheit zu ersetzen oder instandzusetzen.

[0004] Aus DE-A-10 2007 009 301 zählt zwar schon ein gattungsgemäßes Verfahren für eine Pumpe zum Stand der Technik, bei dem der Durchflusswert von einem Regler während des Betriebs der Pumpe anhand der Drehzahl und anhand von zuvor tabellarisch abgelegten Werten ermittelt und mit einem Durchflussschwellenwert verglichen wird, allerdings dient die dort beschriebene Überwachung zur Ermittlung von gefährlichen Betriebszuständen und nicht zur Überwachung des Wirkungsgrades.

[0005] Aus EP-A-1 564 411 mit allen Merkmalen des Oberbegriffs des Anspruchs 1 zählt ein vergleichbares Verfahren zum Stand der Technik, mit dem der ordnungsgemäße Betrieb der Pumpe überwacht wird.

[0006] Vor diesem Hintergrund liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein gattungsgemäßes Verfahren zur Überwachung einer Energieumwandlungseinrichtung, die aus mehreren funktionell miteinander verknüpften Funktionseinheiten besteht, zu verbessern, insbesondere dahingehend, dass nicht nur ein Fehlzustand, sondern auch schon eine Wirkungsgradverschlechterung erfassbar ist. Weiterhin sollen entsprechende Energieumwandlungseinrichtungen zur Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens ausgebildet werden.

[0007] Der verfahrensmäßige Teil dieser Aufgabe wird durch die in Anspruch 1 angegebenen Merkmale gelöst. Aggregate sowie eine Anlage zur Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens sind in den Ansprüchen 13 bis 16 angegeben, vorteilhafte Ausgestaltungen in den Unteransprüchen.

[0008] Die erfindungsgemäße Lösung sieht ein Verfahren zur Überwachung einer Energieumwandlungseinrichtung vor, die aus mehreren funktionell miteinander verknüpften Funktionseinheiten besteht, zu schaffen, bei dem leistungsabhängige Größen mindestens einer Funktionseinheit in zeitlichen Abständen selbsttätig erfasst und/oder errechnet werden und miteinander oder mit davon abgeleiteten Werten und/oder mit vorgegebenen Werten verglichen werden und in Abhängigkeit dieses Vergleichs ein entsprechendes Signal erzeugt wird. Erfindungsgemäß werden dabei leistungsabhängige Größen mindestens zweier funktionell miteinander verknüpfter Funktionseinheiten, vorzugsweise sämtlicher Funktionseinheiten in zeitlichen Abständen selbsttätig erfasst und/oder errechnet, wobei die leistungsabhängigen Ausgangsgrößen oder davon abgeleitete Größen der einen Funktionseinheit die leistungsabhängigen Eingangsgrößen des dieser funktionell nachgeschalteten Funktionseinheit bilden. Anhand dieses Signals kann dann festgestellt werden, ob die Einrichtung noch mit der gewünschten Effektivität arbeitet, ggf. eine oder auch mehrere Funktionseinheiten ungenügende Leistung erbringen bzw. mit einem verringerten Wirkungsgrad arbeiten und somit ermittelt werden, ob die Einrichtung instandzusetzen oder auszutauschen ist. Durch diese Verknüpfung können bei der Berechnung mathematische Modelle eingesetzt werden und die vorgenannten Überwachungsaufgaben unter Zugrundelegung nur vergleichsweise weniger zu messender Größen zuverlässig gewährleistet werden.

[0009] Der Grundgedanke des Verfahrens liegt darin, mindestens eine Funktionseinheit in zeitlichen Abständen hinsichtlich ihres Wirkungsgrades zu überwachen und das Ergebnis mittels eines Signals anzuzeigen oder automatisch auswertbar zu machen. Dabei werden in einfachster Form in zeitlichen Abständen leistungsabhängige Größen einer Funktionseinheit selbsttätig erfasst und mit vorgegebenen, mit zuvor ermittelten oder davon abgeleiteten Werten verglichen. So kann beispielsweise durch Vergleich einer unmittelbar nach Inbetriebnahme der Einrichtung ermittelten leistungsabhängigen Größe einer ihrer Funktionseinheiten und Vergleich mit vorgegebenen Werten ermittelt werden, ob überhaupt die fabrikmäßig vorgesehene Performance erbracht wird oder nicht. Es kann dann in weiteren, vorzugsweise größeren zeitlichen Abständen durch Vergleich mindestens einer leistungsabhängigen Größe ermittelt werden, ob und in welchem Maße sich der Wirkungsgrad der Funktionseinheit verschlechtert hat. Dabei wird vorteilhaft gemäß der Erfindung nicht nur eine, sondern es werden zweckmäßigerweise sämtliche den Wirkungsgrad der Einrichtung wesentlich bestimmende Funktionseinheiten in der vorbeschriebenen Weise überwacht. Durch die Überwachung des

Leistungsverhaltens und entsprechende Signalverarbeitung kann eine Energieumwandlungseinrichtung, also insbesondere ein Aggregat, eine Maschine oder eine Anlage selbstlernend seine individuellen Leistungseigenschaften, das daraus resultierende Betriebsverhalten, die Lebenserwartung und dergleichen ermitteln und anzeigen.

[0010] Leistungsabhängige Größen im Sinne der vorliegenden Erfindung sind solche, welche in irgendeinem Zusammenhang mit der Leistungscharakteristik einer Funktionseinheit stehen. So kann beispielsweise bei diskontinuierlich arbeitenden Aggregaten, wie beispielsweise dem Kompressor eines Kühlschrankes, auch der zeitliche Verlauf der Ein- und Ausschaltvorgänge eine leistungsabhängige Größe im Sinne der vorliegenden Erfindung sein.

[0011] Vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens sowie nach dem erfindungsgemäßen Verfahren arbeitende Einrichtungen sind in den weiteren Ansprüchen sowie der nachfolgenden Beschreibung und Zeichnung angegeben.

[0012] Vergleichsweise einfach kann die erfindungsgemäße Wirkungsgradüberwachung der Einrichtung oder zumindest einzelner Funktionseinheiten der Einrichtung erfolgen, wenn die Funktionseinheiten stets im gleichen Betriebspunkt laufen, da dann typischerweise ein Messwert ausreicht, um die bestimmungsgemäße oder abgefallene Leistung/Wirkungsgrad der jeweiligen Einheit zu bestimmen. Komplizierter ist dies jedoch, wenn eine Energieumwandlungseinrichtung wie beispielsweise eine Heizungsumwälzpumpe zu überwachen ist. Derartige Aggregate bestehen typischerweise aus den Funktionseinheiten Motor und Kreiselpumpe, wobei die Kreiselpumpe typischerweise ständig ihren Betriebspunkt ändert, da sich der Rohrnetzwiderstand der Heizungsanlage aufgrund äußerer Einflüsse ändert. Um hier vergleichbare leistungsabhängige Größen zu haben, ist es zwecksmäßig, die sich anhand eines elektrisch-mechanischen Motormodells sowie die sich aufgrund eines mechanisch-hydraulischen Pumpenmodells ergebenden Größen an der Schnittstelle zwischen Motor und Pumpe anzuwenden, um auf diese Weise den Leistungsstand des Pumpenaggregats zu ermitteln. Alternativ kann die Ermittlung auch dadurch erfolgen, dass zwei hydraulische Größen der Pumpe, typischerweise die Fördermenge und die Förderhöhe ermittelt werden und über eine entsprechende Modellrechnung mit der vom Motor abgegebenen mechanischen Leistung gleichgesetzt werden.

[0013] Besonders vorteilhaft ist es, bei derartigen Einrichtungen, bei denen die Betriebspunkte ständig wechseln und somit davon auszugehen ist, dass bei zeitlich mit Abstand erfolgenden Messungen aller Voraussicht nach nicht derselbe Betriebspunkt wieder erreicht wird, in zeitlich kurzem Abstand mehrere Messungen durchzuführen und anhand der so ermittelten Betriebspunkte leistungsabhängige, ggf. mehrdimensionale Flächenverläufe an den Schnittstellen der Funktionseinheiten zueinander zu ermitteln und mit zuvor ermittelten zu vergleichen. Dabei werden diese rechnerisch ermittelten Flächen vorteilhaft unter Verwendung eines Kálmán-Filters angenähert, so dass schon mit vergleichsweise wenigen Messungen die jeweilige leistungsbestimmende Fläche hinreichend genau bestimmt werden kann. Es kann dann der Abstand solcher in längerem zeitlichen Abstand ermittelten Flächen in einem bestimmten Betriebspunkt oder das zwischen den Flächen aufgespannte Volumen als Maß für die Wirkungsgradänderung, typischerweise den Wirkungsgradabfall herangezogen werden.

[0014] Vorteilhaft wird das erfindungsgernäße Verfahren während des normalen Betriebs der Einrichtung, also bei einem Pumpenaggregat während des bestimmungsgemäßen Förderbetriebs durchgeführt, wobei der zeitliche Abstand zum Erfassen der quasi zeitgleichen Betriebspunkte zur Bestimmung des Flächenverlaufs im Bereich von beispielsweise Minuten liegen kann, wohingegen das Zeitintervall, nach dem eine Vergleichsmessung durchgeführt wird, im Tages-, Wochen- oder Monatsbereich liegen kann, je nach Gerätetyp. Vergleichsweise lange Intervalle werden sich z. B. bei Heizungsumwälzpumpen ergeben, wohingegen kurze Intervalle bei Kompressoren, insbesondere für Kühlanlagen zweckmäßig sein können, da mit einem solchen Überwachungsverfahren nicht nur eine Wirkungsgradverschlechterung, sondern auch ein möglicherweise zu erwartender Ausfall der Einrichtung detektiert werden kann.

[0015] Der zeitliche Abstand, in welchem die zum Vergleich anstehenden leistungsabhängigen Größen ermittelt werden, hängt also sowohl vom Maschinentyp, als auch vom Einsatzzweck ab. Der Vergleich erfolgt jedoch zweckmäßigerweise unter Zugrundelegung der zuvor erfassten Größen oder vorgegebener Werte, wobei letzteres Verfahren den Vorteil hat, dass damit auch bereits eine Schlechtfunktion bei Inbetriebnahme detektierbar ist.

[0016] Mit deutlich geringerem messtechnischen und rechnerischen Aufwand kann das erfindungsgemäße Verfahren durchgeführt werden, wenn zunächst eine die Leistungsaufnahme des Motors bestimmende elektrische Größe des Motors und mindestens eine den hydraulischen Betriebspunkt der Pumpe bestimmende Größe erfasst und gespeichert werden und für die spätere Vergleichsmessung so lange gewartet wird, bis der zuvor erfasste hydraulische Betriebspunkt erneut erreicht ist und dann die Leistungsaufnahme des Motors bestimmende Größen des Motors erfasst und mit den zunächst gespeicherten verglichen werden. Dann kann ein direkter Vergleich erfolgen, ohne dass Betriebspunktabweichungen und damit die vorgenannten Flächenverläufe ermittelt werden müssen.

[0017] Alternativ können auch die später zur Vergleichsmessung erfassten Größen in einem beliebigen Betriebspunkt der Anlage erfasst werden, wenn die erfassten Größen unter Zugrundelegung eines mathematischen, elektrischen Motormodells und/oder eines mathematischhydraulischen Pumpenmodells transferiert, d.h. auf betriebspunktunabhängige Größen umgerechnet werden und dann mit den gespeicherten Größen verglichen werden oder umgekehrt, so dass auch unabhängig vom Betriebspunkt ein Vergleich der leistungsbestimmenden Größen möglich ist.

[0018] Vorteilhaft wird gemäß der Erfindung das Verfahren erst nach Ablauf einer vorbestimmten Zeit angewendet,

wobei diese vorbestimmte Zeit mindestens der Einfahrzeit des Aggregats, insbesondere des Pumpenaggregats entspricht. Dies ist sinnvoll, damit sich die mechanischen Teile des Aggregats einstellen, etwaige Einfahrwiderstände in den Lagern überwunden werden und dann nach der Einfahrzeit ein zunächst quasi stationärer Betriebszustand erreicht werden kann, der eine Basis für die normalen leistungsbestimmenden Eigenschaften des Gerätes bildet, so dass nur Abweichungen von diesem Zustand später detektiert werden.

[0019] Hierbei ist es besonders vorteilhaft, wenn nach Ablauf der vorbestimmten Zeit, also typischerweise der Einfahrzeit selbsttätig mindestens ein Betriebsprofil erfasst und der zu erwartende Energieverbrauch unter Berücksichtigung der ggf. ermittelten Wirkungsgradänderung bestimmt und durch geeignete Mittel angezeigt wird. Mit diesem Verfahren ist es möglich, nach der Einfahrzeit selbsttätig zu ermitteln, ob das Aggregat die hinsichtlich Leistung/Wirkungsgrad angegebenen Werte erfüllt bzw. welcher darüber hinausgehende veränderte Energieverbrauch aufgrund einer Wirkungsgradverschlechterung zu erwarten sein wird.

[0020] Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist es für eine Vergleichsmessung nicht erforderlich, denselben Betriebspunkt anzufahren. Es kann vielmehr anhand mehrerer Betriebspunkte ein von der Leistung einer Funktionseinheit abhängiger, mehrdimensionaler Modellcharakter aufweisender Flächenverlauf ermittelt und gespeichert werden und in zeitlichen Abständen erneut ein solcher Flächenverlauf ermittelt und gespeichert und mit dem oder einem zuvor ermittelten verglichen werden, wobei dann der Abstand der Flächenverläufe in einem vorbestimmten Betriebspunkt oder Betriebsbereich oder das zwischen den Flächenverfäufen aufgespannte Volumen als Maß für die Wirkungsgradänderung herangezogen werden. Eine solche Auswertung ist besonders vorteilhaft, da sie während des kontinuierlichen Betriebs ohne jeglichen Eingriff in das Betriebsverhalten der Maschine erfolgen kann. Ein solches Verfahren ist insbesondere bei Kreiselpumpenaggregaten, wie sie beispielsweise als Heizungsumwälzpumpen eingesetzt werden, von Vorteil, die üblicherweise auf sich ständig ändernden Betriebspunkten laufen. Zur Ermittlung des Flächenverlaufs anhand der Betriebspunkte wird vorteilhaft ein Kálmán-Filter verwendet. Dieses Iterationsverfahren erlaubt es, mit nur einer vergleichsweise kleinen Anzahl von gemessenen Betriebspunkten den Flächenverlauf hinreichend genau zu bestimmen, um die hier in Rede stehenden Abweichungen zu detektieren und quantitativ bestimmen zu können.

[0021] Das erfindungsgemäße Verfahren kann prinzipiell bei beliebigen Energieumwandlungseinrichtungen, die aus mehreren funktionell miteinander verknüpften Funktionseinheiten bestehen, zur Überwachung eingesetzt werden. Besonders vorteilhaft ist der Einsatz bei Kreiselpumpenaggregaten, bei Kompressoren, bei Heizungsanlagen, bei Kühlschränken, Gefriertruhen und dergleichen, die typischerweise über Jahre und Jahrzehnte betrieben werden, ohne dass eine Wirkungsgradverschlechterung auffallen würde oder sich ein Ausfall ankündigt. So ist das erfindungsgemäße Überwachungsverfahren sowohl geeignet, einen Schlechtlauf, also eine Wirkungsgradverschlechterung zu detektieren und anzuzeigen, der einen vorzeitigen Austausch des Aggregats oder zumindest einer Funktionseinheit des Aggregats wirtschaftlich sinnvoll erscheinen lässt, als auch, wie dies beispielsweise bei Gefriertruhen oder Gefrierschränken von besonderem Vorteil ist, den zu erwartenden Ausfall des Aggregates anzeigen zu können, um rechtzeitig für Ersatz zu sorgen. Auch bei größeren Maschinen, deren Stillstand wirtschaftliche Konsequenzen nach sich zieht, kann das erfindungsgemäße Verfahren wirksam eingesetzt werden, um einen bevorstehenden Ausfall rechtzeitig vorher anzuzeigen. Es versteht sich, dass dann zweckmäßigerweise entsprechende Kennwerte vorgegeben werden, welche im Laborversuch zuvor ermittelt wurden, so dass anhand der Wirkungsgradänderung bzw. des Leistungsänderungsveriaufs der Maschine die Ausfallzeit zumindest grob bestimmt werden kann.

[0022] Das erfindungsgemäße Verfahren kann vorteilhaft in Form eines Softwareprogramms in die bei modernen Aggregaten ohnehin vorhandene digitale Steuer- und Regelelektronik implementiert werden. Bei Pumpenaggregaten und Kompressoren kann eine solche Steuer- und Regelelektronik sowohl im Aggregat selbst als auch in dem Klemmen- oder Anschlusskasten des Aggregats vorgesehen sein.

[0023] Vorteilhaft wird das erfindungsgemäße Verfahren bei einem Kreiselpumpenaggregat mit einem elektrischen Motor und einer davon angetriebenen Kreiselpumpe in einer dort vorgesehenen Einrichtung zur Überwachung der Leistungscharakteristik von mindestens einer Funktionseinheit des Aggregats angewandt. Auch bei einem Kompressoraggregat mit einem elektrischen Motor und einer davon angetriebenen Verdrängerpumpe kann eine solche nach dem erfindungsgemäßen Verfahren arbeitende Einrichtung zur Überwachung der Leistungscharakteristik, insbesondere zur Wirkungsgraderfassung und -überwachung vorgesehen sein. Vorteilhaft kann ein Kühlaggregat mit einem elektrischen Motor, mit einer davon angetriebenen Verdrängerpumpe, mit einem Verdampfer und mit einem Kondensator mit einer Einrichtung zur Überwachung der Leistungscharakteristik versehen sein, die nach dem erfindungsgemäßen Verfahren arbeitet, wobei die Überwachung der Leistungscharakteristik sich nicht nur auf Motor und Verdrängerpumpe beschränkt, sondern vorteilhaft Verdampfer und Kondensator mitumfasst.

[0024] Insbesondere bei Kühlschränken ist eine Verminderung des Wirkungsgrades dadurch zu ermitteln, dass die Laufzeit des Kompressors nach der Installation der Einrichtung überwacht wird. Dies kann beispielsweise dadurch erfolgen, dass die Laufzeit innerhalb von 24 Stunden ermittelt wird und dann später, beispielsweise nach sechs Monaten mit der sich dann ergebenden Laufzeit innerhalb von 24 Stunden verglichen wird. Es ist in einfachster Form davon auszugehen, dass aufgrund von gleichbleibenden Umgebungsverhältnissen und Benutzerverhalten eine zunehmende

Einschaltdauer durch eine Wirkungsgradverschlechterung der Anlage bedingt ist. Genauere Rückschlüsse lassen sich durch eine Analyse des zeitlichen Verlaufs der Kompressorlaufzeit ermitteln.

[0025] In analoger Weise kann bei einer Heizanlage eine Einrichtung zur Überwachung der Leistungscharakteristik vom Brenner und mindestens einem von diesem beheizbaren Wasserkreislauf vorgesehen sein, um auf diese Weise beispielsweise Verbrennungsrückstände am Primärwärmetauscher und damit einhergehende Wirkungsgradverschlechterungen erfassen zu können. Hier kann durch Anbringung einer entsprechenden Signallampe somit auch ein Hinweis auf den erforderlichen Reinigungsservice gegeben werden, der damit bedarfsabhängig bestimmt werden kann.

[0026] Zweckmäßigerweise ist die Einrichtung so ausgebildet, dass sie selbsttätig nach einer vorbestimmten Zeit nach Inbetriebnahme des Aggregats bzw. der Anlage mit der Erfassung und Speicherung der zur Überwachung der Leistungscharakteristik, insbesondere zur Wirkungsgradermittlung und -überwachung relevanten Größen beginnt und in angemessenen zeitlichen Abständen diese Größen erneut erfasst und mit den vorgespeicherten und/oder den ursprünglich gespeicherten Größen vergleicht und eine ggf. unzulässig hohe Abweichung anzeigt. Die Einrichtung weist daher gemäß einer Weiterbildung der Erfindung vorteilhaft einen Messwertspeicher auf, in dem zumindest die zu Beginn der Messung erfassten Größen oder davon abgeleitete Größen abgespeichert sind.

[0027] Zweckmäßigerweise wird mit dem erfindungsgemäßen Verfahren die Maschine nach Möglichkeit in ihrer Gesamtheit überwacht. Es kann jedoch auch ausreichend sein, nur eine Funktionseinheit der Maschine zu überwachen. Dies wird insbesondere dann sinnvoll sein, wenn die Maschine eine Funktionseinheit aufweist, die typischerweise deutlich vor allen anderen Funktionseinheiten durch Verschleiß oder auch anderweitig ausfällt.

[0028] Besonders vorteilhaft ist es, wenn mehrere oder bevorzugt sämtliche Funktionseinheiten einer Energieumwandlungseinrichtung, also einer Maschine, eines Aggregats oder einer Anlage erfasst werden, um im Falle einer Wirkungsgradverschlechterung diese dann gezielt einer oder mehreren Funktionseinheiten zuordnen zu können, um dann gezielt nur diese Funktionseinheit oder Funktionseinheiten instandzusetzen oder auszutauschen. Dies wird insbesondere bei größeren Maschinen wirtschaftlich sinnvoll sein.

[0029] Die Erfindung ist nachfolgend anhand von in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 anhand eines Schaubilds das grundlegende Prinzip eines mit Leistungsflächen arbeitenden erfindungsgemäßen Überwachungsverfahrens,

Fig. 2 a das Überwachungsverfahren nach Fig. 1, dargestellt anhand eines Kreiselpumpenaggregates,

Fig. 2 b ein alternatives Überwachungsverfahren für eine Kreiselpumpe,

Fig. 2 c eine weitere Variante eines Überwachungsverfahrens für eine Kreiselpumpe,

Fig. 3 ein Überwachungsverfahren, dargestellt anhand eines Kompressors,

Fig. 4 ein Überwachungsverfahren, dargestellt anhand eines Kühlgeräts und

Fig. 5 ein Überwachungsverfahren, dargestellt anhand einer Heizungsanlage.

[0030] In Fig. 1 ist eine Energieumwandlungseinrichtung bestehend aus den Funktionseinheiten 1 und 2 beispielhaft für eine Vielzahl von Maschinen, Anlagen und Aggregaten dargestellt. Im dargestellten Ausführungsbeispiel werden die Funktionseinheiten 1 und 2 unabhängig voneinander überwacht. Dabei wird zunächst einmal die von der Funktionseinheit 1 aufgenommene Leistung P_1 in Abhängigkeit von einer oder mehreren Variablen $\overline{x}_1$ erfasst und abgespeichert, wie in Fig. 1 mit 3 dargestellt. Die Variablen $\overline{x}_1$ sind durch $\overline{u}_1$ und $\overline{y}_1$ gebildet, so dass die in 3 dargestellte Fläche der Energiebilanz der Funktionseinheit 1 am Eingang entspricht. Entsprechend stellt sich am Ausgang eine Leistung P_2 ein, die wiederum abhängig von den Variablen $\overline{x}_1$ ist. Diese Fläche ist in 4 dargestellt. Die Funktionseinheiten 1 und 2 sind funktionell, z. B. über eine Welle, miteinander verbunden, weshalb die Darstellung 4 der Darstellung 5 entspricht, welche die Leistung P_2 hier in Abhängigkeit von $\overline{x}_2$ entsprechend der Energiebilanz am Eingang der Funktionseinheit 2 definiert und zwar im Abhängigkeit der Variablen $\overline{u}_2$ und $\overline{y}_2$. Am Ausgang der Funktionseinheit 2 stellt sich eine Leistung P_3 ein, wie sie in 6 dargestellt ist und die abhängig von $\overline{x}_2$ ist.

[0031] Die in den Darstellungen 3 bis 6 durch Schraffur gekennzeichnete Flächen werden zu Beginn des Verfahrens ermittelt. Dies kann fabrikmäßig erfolgen oder aber auch erst nach einiger gewissen Zeit im Betrieb. Dies kann als Initialisierungsvorgang erfolgen oder auch während des Betriebs. In jedem Fall erfolgt es zu einem Zeitpunkt t_1, der, wenn mehrere Betriebspunkte zu erfassen sind, auch einen Zeitbereich darstellen kann. Zu einem Zeitpunkt t_2 wird

dann in gleicher Weise eine Energiebilanz am Eingang der Funktionseinheit 1, am Ausgang der Funktionseinheit 1, am Eingang der Funktionseinheit 2 und am Ausgang der Funktionseinheit 2 erstellt. Die entsprechenden Darstellungen sind mit 3', 4', 5' und 6' gekennzeichnet. Durch Vergleich dieser zum Zeitpunkt t_2, der ebenfalls ein Zeitbereich sein kann, ermittelten Größen bzw. Flächen mit den zum Zeitpunkt t_1 ermittelten und gespeicherten Größen bzw. Flächen können Wirkungsgradabsenkungen einzelner Funktionseinheiten 1, 2 erfasst werden wobei der Abstand der schraffierten Flächen in 3 und 3' bzw. 4 und 4' bzw. 5 und 5' bzw. 6 und 6' in einem vorbestimmten Betriebspunkt ermittelt oder das zwischen diesen Flächen aufgespannte Volumen ermittelt wird und beim Überschreiten eines vorbestimmten Wertes ein Signal erzeugt wird, welches dem Benutzer kenntlich macht, dass in der Maschine eine Wirkungsgradverschlechterung stattgefunden hat, welche einen Austausch oder eine Reparatur oder einen alsbaldigen Austausch oder eine alsbaldige Reparatur zweckmäßig erscheinen lassen. Hier können durch Abstufung der Werte unterschiedliche Signale erzeugt werden, beispielsweise ein erstes Warnsignal, welches auf einen über einen gewissen Wert verminderten Wirkungsgrad hinweist und ein zweites Warnsignal, das auf eine solche Verminderung des Wirkungsgrades hinweist, die einen Austausch oder eine Reparatur erfordert. Da die Funktionseinheiten 1 und 2 gesondert voneinander überwacht werden, kann weiterhin festgestellt werden, welche der Funktionseinheiten für die Wirkungsgradverminderung ganz oder teilweise verantwortlich ist.

[0032] Wie dies bei einer konkreten Anwendung aussehen kann, ist beispielsweise anhand von Fig. 2a, b und c dargestellt. Dargestellt ist dort eine Einrichtung bestehend aus einem Elektromotor 1a und einer Pumpe 2a, die einen Verbraucher 7 speist. Die vom Motor 1a aufgenommene elektrische Leistung ist mit P_1 angegeben. Der Motor wandelt die elektrische Leistung in ein Drehmoment T_e bei einer Drehzahl ω_r. Diese am Ausgang des Motors 1a anstehende mechanische Leistung P_2 stellt zugleich die am Eingang der Pumpe 2a anstehende mechanische Leistung P_2 dar, die innerhalb der Pumpe in eine hydraulische Leistung P_3 umgewandelt wird, die durch die von der Pumpe zwischen Saug- und Druckseite erzeugte Druckdifferenz Δp und den Volumenstrom durch die Pumpe q bestimmt ist. Um die anhand von Fig. 2a aus Motor 1a und Pumpe 2a bestehende Einrichtung vollständig zu überwachen ist es zweckmäßig, an den jeweiligen Schnittstellen Flächen zu bestimmen, welche die Leistung der jeweiligen Funktionseinheit in jedem möglichen Betriebspunkt umfasst, und zwar jeweils am Eingang und am Ausgang derselben.
Der formelmäßige Zusammenhang stellt sich dabei wie folgt dar:

Variable:

- q ~ Volumenstrom durch die Pumpe [m^3/h]
- Δp ~ von der Pumpe aufgebauter Differenzdruck [bar]
- ω_r ~ Geschwindigkeit der die Pumpe antreibenden Welle [U/sec]
- T_e ~ Drehmoment der Welle [Nm]
- V ~ Versorgungsspannung [V]
- I ~ Versorgungsstrom [A]
- ϕ ~ Winkel zwischen der Versorgungsspannung V und dem Motorstrom I [U]
- ω_e ~ Versorgungsfrequenz [U/sec]
- P_1 ~ dem Motor zugeführte elektrische Leistung [W]
- P_2 ~ mechanische Leistung an der Motorwelle [W]. Die Leistung P_2 ist proportional zum Schlupf s des Motors. Dies ist $P_2 \infty s$.
- P_3 ~ hydraulische Leistung der Pumpe [W]
- ηm ~ Motorwirkungsgrad
- ηp ~ Pumpenwirkungsgrad

[0033] Diese Variablen sind wie folgt miteinander verknüpft:

$$s = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e}$$

$$P_1 = V I \cos(\phi)$$

$$P_2 = \omega_r T_e$$

$$P_3 = \kappa q \Delta p$$

$$\eta_m = \frac{P_2}{P_1}$$

$$\eta_p = \frac{P_3}{P_2}$$

[0034] Die mathematische Beschreibung der die Leistung des Motors in allen Betriebspunkten definierenden Fläche gemäß Darstellung 8 ergibt sich somit aus folgender Gleichung:

$$P_1(\omega_e, s) = v_s \bullet \left[IR_s + J\omega_e(L_{ls} + L_m) - J\omega_e L_m \left(\frac{R_r}{s} + J\omega_e(L_{lr} + L_m) \right)^{-1} J\omega_e L_m \right] v_s \qquad (8)$$

(Gleichung 8)
wobei vorausgesetzt wird, dass die Versorgungsspannung durch den

[0035] Vektor $\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1\omega_e + K_0 \\ 0 \end{bmatrix}$ gegeben ist. *Rs* (Statorwiderstand), L_{ls} (induktive Verluste des Stators), L_m (magnetische Induktion), L_{lr} (induktive Verluste des Rotors), R_r (Rotorwiderstand) und J (Matrix $\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$) sind die Konstanten des Motors.

[0036] Die Leistung am Eingang der Pumpe 2a gemäß Darstellung 9 kann bekanntermaßen durch die Pumpengleichung

$$P_2(q, \omega_r) = -a_{P2} q^2 \omega_r + a_{P2} q \omega_r^2 + a_{P0} \omega_r^3 + B\omega_r^2 \qquad (9)$$

beschrieben werden, in welcher die Konstanten a_{T2}, a_{T1}, a_{T0} und *B* Pumpenkonstanten sind.

[0037] Die am Ausgang der Pumpe 2a anstehende Leistung gemäß Darstellung 10 kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$P_3(q, \omega_r) = -a_{p2} q^3 + a_{p2} q^2 \omega_r + a_{p0} q \omega_r^2 + p_{offset} q \qquad (10)$$

[0038] In dieser Gleichung lauten die Konstanten a_{p2}, a_{p1}, a_{p0} und p_{offset}.

[0039] Die anhand der Darstellungen 8, 9 und 10 in Fig. 2a dargestellten dreidimensionalen Flächen, welche jeweils die Leistung an den Schnittstellen vor, zwischen und hinter den Funktionseinheiten 1 a und 2a beschreiben, werden zu einem Zeitpunkt t_1 erfasst und gespeichert. Die Erfassung erfolgt typischerweise während des normalen Betriebs wäh-

rend einer kurzen Zeitspanne, die bezogen auf das Überwachungsintervall (Zeit von T_1 bis t_2) vernachlässigbar klein ist, wonach dann nach einer längeren Zeitspanne, nämlich zum Zeitpunkt t_2 dieser Vorgang wiederholt wird, sodass sich die Flächen gemäß den Darstellungen 8', 9' und 10' ergeben. Dabei werden die Flächen 8 und 8' sowie 9 und 9' und schließlich 10 und 10' zum Zeitpunkt t_1 und t_2 miteinander verglichen. Wenn die Flächen übereinstimmen, arbeitet das Aggregat unverändert. Wenn hingegen zwei dieser Flächen in einem Betriebspunkt voneinander beabstandet sind, dann hat sich eine der Funktionseinheiten in ihrer Leistungscharakteristik geändert, typischerweise verschlechtert. Wenn also beispielsweise ein Abstand zwischen den Flächen gemäß Darstellung 10 und 10' und im Übrigen übereinstimmende Flächen festgestellt werden, dann ist davon auszugehen, dass zwar der Motor 1a mit unvermindertem Wirkungsgrad arbeitet, dass jedoch innerhalb der Pumpe 2a ein den Wirkungsgrad verändernder Vorgang stattgefunden hat. Umgekehrt kann bei einer Veränderung der Flächen gemäß den Darstellungen 9 und 9' auf gleichbleibende Pumpenleistungscharakteristik jedoch veränderten Motorwirkungsgrad geschlossen werden.

[0040] Bei der Überwachung wie sie anhand von Fig. 2a dargestellt wird, erfolgt eine Leistungsüberwachung vor und hinter jeder Funktionseinheit 1 a, 2a. Dies kann je nach Anwendung jedoch entbehrlich sein. Auch müssen nicht zwingend die die Eingangs- oder Ausgangsleistung repräsentierenden mehrdimensionalen und Modelcharakter aufweisenden Flächenverläufe ermittelt werden, wie sie durch die Gleichungen 8, 9 und 10 definiert sind, sondern es kann, wie das Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 2b verdeutlicht, z.B. an Stelle der Leistung P_3 gemäß Darstellung 10 in Fig. 2a alternativ die hydraulische Leistungscharakteristik ermittelt werden, also der von der Pumpe 2a aufgebrachte Differenzdruck in Abhängigkeit von der Antriebsdrehzahl ω_r und der Durchflussmenge q. Der zum Zeitpunkt t_1 erfasst und gespeichert wird. Die in Darstellung 10a aufgeführte mehrdimensionale Fläche sowie die zum Zeitpunkt t_2 in Darstellung 10a' aufgeführte Fläche ist jeweils durch die Gleichung definiert.

$$\Delta p(q,\omega_r) = -a_{p2}q^2 + a_{p2}q^1\omega_r + a_{p0}\omega_r^2 + p_{offset} \qquad (10a)$$

[0041] Anhand von Fig. 2c ist eine weitere Möglichkeit der Überwachung eines solchen Pumpenaggregates bestehend aus den Funktionseinheiten 1a und 2a dargestellt. Wie die Darstellung 11 verdeutlicht, ist dort die Leistung P_1 in Abhängigkeit von ω_e und Q gemäß Darstellung 8a erfasst und wird mit der entsprechenden Leistung gemäß Darstellung 8a' im zeitlichen Abstand zwischen t_1 und t_2 verglichen. Auch die Leistung P_2 wird dort in Abhängigkeit von Δ_p und ω_r bestimmt, wie die Darstellung gemäß 9a bzw. 9a' verdeutlicht. Schließlich wird bei dem anhand von Fig. 2c dargestellten Überwachungskonzept der Wirkungsgrad des Motors η_m sowie der Wirkungsgrad der Pumpe η_p direkt überwacht, wie die Darstellungen 11a und 11b bzw. 11a' und 11b' verdeutlichen. Diese Unterschiede sollen lediglich verdeutlichen, dass es eine Vielzahl von Möglichkeiten der Überwachung der Leistungscharakteristik der gesamten Einrichtung aber auch der Funktionseinheiten davon gibt, wie dies vorstehend anhand des aus den Funktionseinheiten Motor 1a und Pumpe 2a bestehenden Kreiselpumpenaggregats verdeutlicht worden ist.

[0042] Der Wirkungsgrad des Motors η_m ist der Quotient aus P_2 und P_1 und ist abhängig von ω_e (der Versorgungsfrequenz) und *s*, dem Schlupf des Motors. Der Motorwirkungsgrad ist in Fig. 2c in der Darstellung 11 a durch die Fläche im Diagramm in jedem Betriebspunkt dargestellt. In der Darstellung 9a ist die Leistung P_2 in Abhängigkeit von Δp und ω_r gezeigt. Daraus ergibt sich der Wirkungsgrad der Pumpe η_p in Abhängigkeit von der Pumpendrehzahl (ω_r) und der Fördermenge *q*, wie die in 11 b dargestellte Fläche verdeutlicht. In 8a ist die Leistung P_1 des Motors 1 a in Abhängigkeit der Versorgungsfrequenz und der Durchflussmenge der Pumpe ebenfalls in Form einer Fläche dargestellt. Analog zu Fig. 1 sind die anhand der Flächen 8a, 9a, 11a und 11 b dargestellten Leistungen bzw. Wirkungsgrade zum Zeitpunkt t_1 ermittelt und abgespeichert worden, wohingegen zum Zeitpunkt t_2 entsprechende Vergleichsflächen ermittelt worden sind, wobei als Maß für die Wirkungsgradveränderung der Abstand der Flächen in den Darstellungen 11a und 11 a' sowie 11 b und 11b' herangezogen werden. Wenn beispielsweise der Wirkungsgrad der Pumpe 2a im Laufe der Zeit t_1 bis t_2 aufgrund eines Lagerschadens nachlässt, so werden die Flächen in den Darstellungen 11a und 11 a' ineinander liegen, wohingegen die Flächen in den Darstellungen 11 b und 11b' einen deutlichen Abstand voneinander aufweisen werden, bezogen auf einen Betriebspunkt. Anstelle dieses Abstands kann auch ein Volumen definiert werden.

[0043] Anhand von Fig. 3 ist beispielhaft dargestellt, wie mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ein Kompressor überwacht werden kann. Der Kompressor-weist eine Funktionseinheit 1 b in Form eines Motors und eine davon angetriebene Funktionseinheit 2b in Form einer Verdrängerpumpe auf, welche einen Verbraucher 7b speist. Auch hier werden zu einem Zeitpunkt t_1 eine die Motorleistung repräsentierende Fläche gemäß Darstellung 12 sowie eine die Pumpenleistung repräsentierende Fläche gemäß Darstellung 13 ermittelt und gespeichert und in zeitlichem Abstand, beispielsweise zum Zeitpunkt t_2, entsprechend den Darstellungen 12' und 13' anhand aktueller Werte zum Zeitpunkt t_2 ermittelt und mit den gespeicherten vergleichen, wobei auch hier der Abstand der Flächen gemäß den Darstellungen 12 und 12' bzw. 13 und 13' und das dazwischen aufgespannte Volumen als Maß für die Wirkungsgradverschlechterung herangezogen wird. Die rechnerischen Zusammenhänge ergeben sich wie folgt:

- p_{in} ~ Eingangsdruck am Kompressor [bar]
- p_{out} ~ Ausgangsdruck am Kompressor [bar]
- T_{in} ~ Eingangstemperatur am Kompressor [°*K*]
- T_{out} ~ Ausgangstemperatur am Kompressor [°*K*]
- ω_r ~ Drehzahl der den Kompressor antreibenden Welle [U/sec]
- P_1 ~ vom Motor aufgenommene elektrische Leistung [W]
- P_2 ~ Leistung an der Antriebswelle [W]. Die Leistung P_2 ist proportional zum Schlupf des Motors *s*. Dies ist $P_2 \infty s$.

[0044] Weiterhin gelten die folgenden mathematischen Beziehungen:

$$P_2 = \omega_r T_e$$

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\ln(T_{out}) - \ln(T_{in})}{\ln(p_{out}) - \ln(p_{in})} \qquad (11)$$

[0045] Bei einem adiabaten Kompressionszyklus ergibt sich somit die Leistung P_2 wie folgt:

$$P_2 = k_0 \omega_r p_{in} \ln\left(\frac{p_{out}}{p_{in}}\right) + k_1 \omega_r^2 + k_2 \omega_r^3 \qquad (13)$$

wobei $k = \Delta V/(2\pi)$ ist.

[0046] Für den Fall, dass im Kompressorkreislauf kein adiabater Prozess abläuft, kann die Leistung wie folgt angegeben werden:

$$P_2 = k_0 \omega_r p_{in}\left(\left(\frac{p_{out}}{p_{in}}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right) + k_1 \omega_r^2 + k_2 \omega_r^3, \qquad (12)$$

wobei $k = \Delta V$ n/(n-1) $/(2\pi)$, wobei *n* eine Konstante ungleich 1 ist, die den Wärmefluss während der Kompression beschreibt. Wenn der Prozess unter konstanter Temperatur abläuft, kann somit *n* ebenfalls als konstant angenommen werden. Der Ausdruck $n/(n\text{-}1)$ ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$T_{out} = T_{in}(P_{out}/P_{in})^{(n-1)/n}$$

[0047] Das bedeutet, dass dieser Ausdruck anhand der Temperaturen T_{in} und T_{out} sowie der Drücke P_{out} und P_{in} wie folgt ermittelt werden kann:

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\ln(T_{out}) - \ln(T_{in})}{\ln(p_{out}) - \ln(p_{in})} \qquad (11)$$

[0048] Die Motorleistung P_1 kann in analoger Weise wie oben durch die Gleichung (8) angeben überwacht werden.

[0049] Anhand von Fig. 4 ist das erfindungsgemäße Verfahren für einen Kühlschrank dargestellt bestehend aus einem

Motor 1c, einer Verdrängerpumpe 2c, deren Ausgang einen Verdampfer 3c beaufschlagt, der über eine Drossel 4c mit einem Kondensator 5c verbunden ist, dessen Ausgang mit dem Eingang der Pumpe 2c leitungsverbunden ist. Der Kühlraum ist mit 7c gekennzeichnet.

[0050] In diesem System ergeben sich folgende Variablen:

- T_i ~ Temperatur am Austritt des Verdampfers 3c
- T_h ~ Temperatur am Eintritt des Kondensators 5c
- T_{box} ~ Temperatur im Kühlraum 7c
- T_{amb} ~ Umgebungstemperatur
- Q_1 ~ Kühlleistung
- Q_2 ~ an die Umgebung abgegebene Leistung
- W ~ von der Pumpe 2c abgegebene Leistung
- ω_r ~ Geschwindigkeit der Motorwelle [U/sec]
- T_e ~ Drehmoment [Nm]
- P_2 ~ vom Motor abgegebene mechanische Leistung

[0051] Diese stehen in folgendem mathematischen Zusammenhang:

$$P_2 = \omega_r T_e$$

$$T_{eq} = \frac{T_h - T_l}{T_l} \cdot (T_{amb} - T_{box}) \qquad (14)$$

[0052] Die die Leistung des Motors 1c beschreibende Fläche gemäß Darstellung 14 entspricht der gemäß Darstellung 12 in Fig. 3 bzw. Darstellung 8 in Fig. 2a Für die die Leistung P_2 und P_3 definierenden Flächen ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$P_2 = R_{th} \cdot \frac{T_h - T_l}{T_l} \cdot (T_{amb} - T_{box}) + K_\omega \cdot \omega^3 \qquad (15)$$

$$P_3 = R_{th} \cdot \frac{T_h - T_l}{T_l} \cdot (T_{amb} - T_{box}) \qquad (17)$$

[0053] Die Gleichung 15 beschreibt dabei die Leistung P_2 am Eingang des Kompressors wohingegen die Gleichung 17 die Leistung am Ausgang des Kompressors beschreibt. Wie insbesondere die Darstellung 17 verdeutlicht, können die hier zur Ermittlung der Leistung an den Schnittstellen der Funktionseinheiten zu ermittelnden Flächen zwei- oder mehrdimensional sein. Die Fläche gemäß Darstellung 17 ist zweidimensional, also eine Linie. Die übrigen hier dargestellten Flächen sind sämtlichst dreidimensional. Es versteht sich, dass diese Flächen ggf. auch mehr als dreidimensional sein können, je nach Art der zu überwachenden Maschine und der dahinter stehenden mathematisch physikalischen Zusammenhänge.

[0054] Auch hier erfolgt die Überwachung in analoger Weise, indem die die Leistung an den Schnittstellen der Funktionseinheiten angebenden Flächen gemäß Darstellungen 14, 15 und 17 zum Zeitpunkt t_1 sowie nach zeitlichem Abstand zum Zeitpunkt t_2 ermittelt werden (es ergeben sich dann die Flächen gemäß den Darstellungen 14' 15' und 17'), um dann durch Ermittlung des Abstandes der Flächen bzw. das dazwischen aufgespannte Volumen zu ermitteln, welche der Funktionseinheiten 1 c, 2c, um welches Maß in ihrem Wirkungsgrad abgefallen sind.

[0055] Schließlich ist anhand von Fig. 5 dargestellt, wie das erfindungsgemäße Überwachungsverfahren am Primärkreislauf einer Heizungsanlage anwendbar ist. Die Heizungsanlage weist einen Brenner 20 auf, der in einem Brennraum 21 Wasser in einer Leitung 22 erwärmt. Das vom Brenner 20 erwärmte Wasser wird im Primärkreislauf der Heizungsanlage geführt und gelangt nach Abfuhr seiner Wärme in einen Wärmetauscher 23, in welchem das aus dem Brennraum 21 austretende Abgas seine Wärme an das Wasser abgibt. Das Abgas tritt über den Ausgang 24 ins Freie. Die Variablen dieses Systems sind:

- q ~ Volumenstrom des durch die Leitung 22 strömenden Wassers

- $\dot{m}_g$ ~ Abgasmasse
- $T_{w,out}$ ~ die Temperatur des aus der Leitung 22 austretenden Wassers
- $T_{w,in}$ ~ die Temperatur des in die Leitung 22 eintretenden Wassers
- $T_{g.out}$ ~ die Temperatur des Abgases am Austritt
- $T_{g.in}$ ~ die Verbrennungstemperatur
- T_{amb} ~ die Umgebungstemperatur
- P_1 ~ die durch den Brennstoff in das System eingebrachte Leistung
- P_2 ~ die durch das Wasser aus dem System abgeführte Leistung

[0056] Hierbei ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$P_2 = \rho_w q\, C_{pw} (T_{w,out} - T_{w,In})$$

in der p_w die Dichte des Wassers und C_{pw} die spezifische Wärmekapazität des Wassers darstellen. Die zu berechnenden Flächen ergeben sich. hierbei wie folgt und sind zum Zeitpunkt t_1 durch die Darstellung 16 und zum Zeitpunkt t_2 durch die Darstellung 16' angegeben:

$$P_2 = \overline{P}_1 - \overline{\dot{m}}_g C_{pg} T_{w,in} - \overline{\dot{m}}_g C_{pg} \left(\overline{T}_{g,in} - T_{w,out}\right) e^{\frac{UA}{\overline{\dot{m}}_g C_{pg}} - \frac{UA}{q\rho_w C_{pw}}} + \overline{\dot{m}}_g C_{pg} \overline{T}_{amb} \qquad (16)$$

wobei C_{pg} und C_{pw} die spezifische Wärmekapazität des Abgases, U der Wärmeübertragungskoeffizient und A die Wärmeübertragungsfläche zwischen dem Brenner 20 und der Leitung 22 sind. Dabei werden die durch das Abgas abgeführte Leistung $\overline{P}_{in}$ und der Massestrom $\overline{\dot{m}g}$ des Abgases als konstant angenommen, ebenso die Umgebungstemperatur $\overline{T}_{amb}$. Ggf. können diese Größen auch in einfacher Weise durch Messung ermittelt werden.

[0057] Wie die vorstehenden Ausführungsbeispiele verdeutlichen, kann das erfindungsgemäße Verfahren bei unterschiedlichsten Einrichtungen wie Aggregaten, Maschinen und Anlagen eingesetzt werden, wobei vorteilhaft stets die mehrdimensionalen Flächen ermittelt werden, welche jeweils die Leistung an den Schnittstellen der Funktionseinheiten zueinander in jedem beliebigen Betriebspunkt definieren und somit ein zuverlässiges Maß für die Leistungscharakteristik der Funktionseinheiten sowie bei entsprechender Auswertung der gesamten Einrichtung ergeben, wenn diese zu unterschiedlichen Zeitpunkten (z. B. t_1 und t_2) miteinander verglichen werden. Es versteht sich, dass die Zeitpunkte t_1 und t_2 hier nur beispielhaft zu verstehen sind, zweckmäßigerweise bleiben die zum Zeitpunkt t_1 ermittelten Werte stets abgespeichert, um sie mit späteren vergleichen zu können, was jedoch nicht ausschließt, dass auch Zwischenwerte gespeichert werden um ggf. auch die Geschwindigkeit der Änderung zu erfassen. Auch dies kann in einer entsprechenden Auswerteinrichtung ausgewertet werden. Insoweit wird insbesondere auf EP 1 564 411 A1 verwiesen, wo vergleichbare Auswertungen im Einzelnen beschrieben sind.

[0058] Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass bei den vorstehend dargestellten Ausführungsbeispielen stets zwei- oder mehrdimensionale Flächen zur Ermittlung der Leistungsbilanz an den Schnittstellen der Funktionseinheiten verwendet worden sind, da dies eine Auswertung praktisch unabhängig vom jeweiligen Betriebspunkt ermöglicht. Es können bei im Wesentlichen konstanten Betriebspunkten diese Auswertungen auch vereinfacht erfolgen, indem einzelne Größen im zeitlichen Abstand miteinander verglichen werden, über die mittelbar oder unmittelbar Rückschlüsse über den Wirkungsgrad erfolgen können. Die in Rede stehenden zwei- oder mehrdimensionalen Flächen werden vorteilhaft während des Betriebs ermittelt, wobei durch geeignete Iterationsverfahren versucht wird, unter Zugrundelegung möglichst weniger unterschiedlicher Betriebspunkte eine hohe Genauigkeit der Flächen zu erzielen. Dies kann insbesondere unter Verwendung des Kámánfilters erreicht werden, wie weiter oben schon beschrieben worden ist. Es können jedoch auch andere geeignete Iterationsverfahren Verwendung finden. Auch ist es denkbar, dass, beispielsweise bei einem Pumpenaggregat, bestimmte Betriebspunkte gezielt angefahren werden, um die die Leistungsbilanz repräsentierende Fläche mit möglichst hoher Genauigkeit zu erfassen oder durch gezieltes Anfahren von definierten Betriebspunkten auf das Ermitteln solcher Flächen verzichten zu können.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Überwachung einer Energieumwandlungseinrichtung, die aus mehreren funktionell miteinander verknüpften Funktionseinheiten besteht, bei dem leistungsabhängige Größen mindestens einer Funktionseinheit in

zeitlichen Abständen selbsttätig erfasst und/oder errechnet werden und miteinander oder mit davon abgeleiteten Werten und/oder mit vorgegebenen Werten verglichen werden und in Abhängigkeit des Vergleichs ein entsprechendes Signal erzeugt wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** leistungsabhängige Größen mindestens zweier funktionell miteinander verknüpfter Funktionseinheiten in zeitlichen Abständen selbsttätig erfasst und/oder errechnet werden, wobei die leistungsabhängigen Ausgangsgrößen oder davon abgeleitete Größen der einen Funktionseinheit die leistungsabhängigen Eingangsgrößen des dieser funktionell nachgeschalteten Funktionseinheit bilden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Vergleiclhsgrößen oder Vergleichsfunktionen anhand der leistungsabhängigen Größen gebildet werden, welche zum betriebspunktunabhängigen Leistungsvergleich bestimmt und geeignet sind.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** es zur Betriebsoptimierung und/oder zur Überwachung des Energieverbrauchs oder des Wirkungsgrades eines Pumpenaggregats, insbesondere eines elektromotorisch angetriebenen Kreiselpumpenaggregats eingesetzt wird, bei dem im Betrieb mindestens eine leistungsabhängige Größe des Motors und mindestens eine hydraulische Größe der Pumpe oder mindestens zwei hydraulische Größen der Pumpe in zeitlichem Abstand miteinander oder mittels einer mathematischen Verknüpfung davon oder mit vorgegebenen Werten verglichen werden, und in Abhängigkeit des Vergleichs ein den Betriebszustand des Pumpenaggregats kennzeichnendes Signal erzeugt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** es während des bestimmungsgemäßen Förderbetriebs durchgeführt wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** es in zeitlichen Abständen wiederholt wird, wobei der Vergleich unter Zugrundelegung der zuvor erfassten Größen oder der vorgegebenen Werte durchgeführt wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** zunächst die Leistungsaufnahme des Motors bestimmende elektrische Größen des Motors und mindestens eine den hydraulischen Betriebspunkt der Pumpe bestimmende Größe erfasst und gespeichert werden, und in einem zeitlichen Abstand bei Erreichen eines dem zuvor erfassten entsprechenden hydraulischen Betriebspunktes die die Leistungsaufnahme des Motors bestimmenden elektrischen Größen des Motors erfasst und mit den zunächst gespeicherten Größen verglichen werden, wonach ein entsprechendes Signal erzeugt wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** zunächst die Leistungsaufnahme des Motors bestimmende elektrischen Größen des Motors und den hydraulischen Betriebspunkt der Pumpe bestimmende Größen erfasst und gespeichert werden, und bei dem nach in einem zeitlichen Abstand diese Größen erneut erfasst werden, wobei die erfassten Größen unter Zugrundelegung eines mathematischen elektrischen Motormodells und/oder eines mathematisch hydraulischen Pumpenmodells transferriert und dann mit den gespeicherten Größen verglichen werden oder umgekehrt, wonach ein entsprechendes Signal erzeugt wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Erfassen von leistungsbestimmenden Größen von Motor und/oder Pumpe erst nach Ablauf einer vorbestimmten Zeit, welche mindestens der Einfahrzeit des Pumpenaggregats entspricht, erfolgt.

9. Verfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** nach Ablauf der vorbestimmten Zeit während der Überwachungsphase selbsttätig mindestens ein Betriebsprofil erfasst und der zu erwartende Energieverbrauch unter Berücksichtigung der gegebenenfalls ermittelten Wirkungsgradänderung bestimmt wird.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** anhand mehrerer Betriebspunkte einer von der Leistung einer Funktionseinheit abhängiger mehrdimensionaler Modellcharakter aufweisender Flächenverlauf ermittelt und gespeichert wird und dass in zeitlichen Abständen solche Flächenverläufe erneut ermittelt und mit den zuvor ermittelten verglichen werden.

11. Verfahren nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Abstand der Flächenverläufe an einem vorbestimmten Betriebspunkt oder das zwischen den Flächen aufgespannte Volumen als Maß für die Wirkungsgradänderung, insbesondere einen Wirkungsgradabfall herangezogen wird.

12. Verfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Ermittlung des Flächenverlaufs anhand der

Betriebspunkte ein Kalman-Filter verwendet wird.

13. Kreiselpumpenaggregat mit einem elektrischen Motor und einer davon angetriebenen Kreiselpumpe, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Einrichtung zur Überwachung der Leistungscharakteristik von mindestens einer Funktionseinheit des Aggregats vorgesehen ist, die nach einem Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche arbeitet.

14. Kompressoraggregat mit einem elektrischen Motor und einer davon angetriebenen Verdrängerpumpe, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Einrichtung zur Überwachung der Leistungscharakteristik von mindestens einer Funktionseinheit des Aggregats vorgesehen ist, die nach einem Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche arbeitet.

15. Kühlaggregat mit einem elektrischen Motor, mit einer davon angetriebenen Verdrängerpumpe, mit einem Verdampfer und mit einem Kondensator, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Einrichtung zur Überwachung der Leistungscharakteristik von mindestens einer Funktionseinheit des Aggregats vorgesehen ist, die nach einem Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche arbeitet.

16. Heizungsanlage mit einem Brenner und mindestens einem von diesem beheizbaren Wasserkreislauf, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Einrichtung zur Überwachung der Leistungscharakteristik von mindestens einer Funktionseinheit der Anlage vorgesehen ist, die nach einem Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche arbeitet.

17. Aggregat oder Anlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einrichtung selbsttätig nach einer vorbestimmten Zeit nach Inbetriebnahme des Aggregats bzw. der Anlage mit der Erfassung und Speicherung der zur Wirkungsgradermittlung relevanten Größen beginnt.

18. Aggregat oder Anlage nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einrichtung einen Messwertspeicher aufweist, in dem mindestens die zu Beginn der Messung erfassten Größen oder davon abgeleitete Größen abgespeichert sind.

Claims

1. A method for monitoring an energy conversion device which consists of several function units which are functionally linked to one another, in which power-dependent variables of at least one function unit are automatically detected and/or computed in temporal intervals, and are compared to one another or to values derived therefrom and/or to predefined values, and a corresponding signal is produced in dependence on the comparison, **characterised in that** power-dependent variables of at least two function units which are functionally linked to one another are detected and/or computed, in an automatic manner in temporal intervals, wherein the power-dependent output variables or variables derived therefrom, of the one function unit, form the power-dependent input variables of the function unit which is functionally arranged after this.

2. A method according to claim 1, **characterised in that** the comparative values or comparative functions are formed by way of power-dependent variables, which are envisaged and suitable for power comparison which is independent of the operating point.

3. A method according to claim 1 or 2, **characterised in that** it is used for operational optimisation and/or for monitoring the energy consumption or the efficiency of the pump assembly, in particular of an electromotorically driven centrifugal pump assembly, in which on operation, at least one power-dependent variable of the motor and at least one hydraulic variable of the pump or at least two hydraulic variables of the pump, at a temporal interval, are compared to one another or are mathematically linked to one another or compared to predefined values, and a signal characterising the operating condition of the pump assembly is produced in dependence on the comparison.

4. A method according to claim 3, **characterised in that** it is carried out during the designated delivery operation.

5. A method according to one of the preceding claims, **characterised in that** it is repeated in temporal intervals, wherein the comparison is carried out on the basis of the previously detected variables or the predefined values.

6. A method according to one of the claims 3 to 5, **characterised in that** firstly electrical variables of the motor determining the power uptake of the motor, and at least one variable determining the hydraulic operating point of the pump are detected and stored, and in a temporal interval, on reaching a hydraulic operating point corresponding to the previously detected one, the electrical variables of the motor which determines the power uptake of the motor are detected and compared to the firstly stored variables, whereupon a corresponding signal is produced.

7. A method according to one of the claims 3 to 6, **characterised in that** firstly electrical variables of the motor which determine the power uptake of the motor and variables determining the hydraulic operating point of the pump are detected and stored, and in which these variables are detected anew after a temporal interval, wherein the detected variables are transferred on the basis of a mathematical, electrical motor model and/or a mathematical hydraulic pump model and then compared to the stored variables, or vice versa, whereupon a corresponding signal is produced.

8. A method according to one of the claims 3 to 7, **characterised in that** the detection of power-determining variables of the motor and/or pump is not effected until after the completion of a predefined time which corresponds at least to the running-in phase of the pump assembly.

9. A method according to claim 8, **characterised in that** after completion of the predefined time, during the monitoring phase, automatically at least one operating profile is detected and the expected energy consumption is determined whilst taking into account the efficiency change which is possibly determined.

10. A method according to one of the preceding claims, **characterised in that** a surface course which has a multidimensional model character and is dependent on the power of a function unit is determined on the basis of several operating points and stored, and such surface courses are determined anew in temporal intervals and are compared to the previously determined ones.

11. A method according to claim 10, **characterised in that** the distance of the surface courses at a predefined operating point, or the volume spanned between the surfaces is used as a measure for the efficiency change, in particular an efficiency drop.

12. A method according to claim 11, **characterised in that** a Kalman filter is used for determining the surface course on the basis of the operating points.

13. A centrifugal pump assembly with an electrical motor and a centrifugal pump driven by this, **characterised in that** a device for monitoring the power characteristics of at least one function unit of the assembly is provided, said device operating according to a method according to one of the preceding claims.

14. A compressor assembly with an electrical motor and a displacement pump driven by this, **characterised in that** a device for monitoring the power characteristics of at least one function unit of the assembly is provided, said device operating according to a method according to one of the preceding claims.

15. A cooling assembly with an electric motor, with a displacement pump driven by this, with an evaporator and with a condenser, **characterised in that** a device for monitoring the power characteristics of at least one function unit of the assembly is provided, said device functioning according to a method according to one of the preceding claims.

16. A heating facility with a combustor and at least one water circuit which can be heated by this, **characterised in that** a device for monitoring the power characteristics of at least one function unit of the facility is provided, said device operating according to a method according to one of the preceding claims.

17. An assembly or facility according to one of the preceding claims, **characterised in that** after a predefined time after starting operation of the assembly or facility, the device automatically begins with the detection and storage of the variables which are relevant to determining the efficiency.

18. An assembly or facility according to claim 17, **characterised in that** the device comprises a measured value memory, in which at least the variables detected at the beginning of the measurement or variables derived therefrom are stored.

Revendications

1. Procédé de surveillance d'un dispositif de transformation d'énergie composé de plusieurs unités fonctionnelles reliées de façon fonctionnelle les unes aux autres, selon lequel des grandeurs d'au moins une unité fonctionnelle dépendant de la puissance sont captées et/ou calculées automatiquement à des intervalles de temps et sont comparées entre elles ou à des valeurs qui en sont dérivées et/ou à des valeurs de consigne, et selon lequel un signal correspondant est engendré en fonction de la comparaison, **caractérisé en ce que** des grandeurs dépendant de la puissance, d'au moins deux unités fonctionnelles reliées de façon fonctionnelle les unes aux autres sont captées et/ou calculées automatiquement à des intervalles de temps, les grandeurs de sortie dépendant de la puissance, ou des grandeurs qui en sont déduites, de l'une des unités fonctionnelles formant les grandeurs d'entrée dépendant de la puissance, de l'unité fonctionnelle fonctionnellement en aval.

2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les grandeurs de comparaison ou les fonctions de comparaison sont formées sur la base des grandeurs dépendant de la puissance qui sont destinées à ou sont utilisables pour une comparaison de puissance indépendant d'un point de fonctionnement.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce qu'**il est mis en oeuvre pour une optimisation de fonctionnement et/ou une surveillance de la consommation d'énergie ou du rendement d'un groupe motopompe, notamment d'un groupe motopompe à pompe centrifuge entraîné par un moteur électrique dans lequel, en fonctionnement, au moins une grandeur dépendant de la puissance du moteur et au moins une grandeur hydraulique de la pompe ou au moins deux grandeurs hydrauliques de la pompe sont comparées les unes aux autres dans un intervalle de temps ou à l'aide d'un lien mathématique ou à des valeurs de consigne et **en ce qu'**un signal représentatif de l'état de fonctionnement du groupe motopompe est engendré en fonction de la comparaison.

4. Procédé selon la revendication 3, **caractérisé en ce qu'**il est mis en oeuvre pendant le fonctionnement de pompage prévu.

5. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'**il est répété à des intervalles de temps, la comparaison étant faite sur la base des grandeurs précédemment saisies ou des valeurs de consigne.

6. Procédé selon l'une des revendications 3 à 5, **caractérisé en ce que** sont saisies et stockées d'abord des grandeurs électriques du moteur déterminant la puissance d'entrée du moteur et au moins une grandeur déterminant le point de fonctionnement hydraulique de la pompe et que sont saisies, à un intervalle de temps lorsqu'un point de fonctionnement hydraulique est atteint qui correspond à celui précédemment saisi, les grandeurs électriques déterminant la puissance d'entrée du moteur et qu'elles sont comparées aux grandeurs stockées d'abord et qu'il est engendré ensuite un signal correspondant.

7. Procédé selon l'une des revendications 3 à 6, **caractérisé en ce que** sont saisies et stockées d'abord des grandeurs électriques du moteur déterminant la puissance d'entrée du moteur et des grandeurs déterminant le point de fonctionnement hydraulique de la pompe et que ces grandeurs sont saisies de nouveau à un intervalle de temps, les grandeurs saisies étant transférées sur la base d'une modélisation mathématique électrique du moteur et/ou d'une modélisation mathématique hydraulique de la pompe et qu'elles sont comparées ensuite aux grandeurs stockées, ou inversement, un signal correspondant étant engendré ensuite.

8. Procédé selon l'une des revendications 3 à 7, **caractérisé en ce que** la saisie de grandeurs déterminant la puissance du moteur et/ou de la pompe est effectuée seulement après écoulement d'un temps prédéterminé qui correspond au moins au temps de rodage du groupe motopompe.

9. Procédé selon la revendication 8, **caractérisé en ce que**, après écoulement du temps prédéterminé, pendant la phase de surveillance, au moins un profil de fonctionnement est saisi automatiquement et que la consommation d'énergie à prévoir est déterminée en prenant en compte le changement de rendement déterminé le cas échéant.

10. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'**il est déterminée et stockée, sur la base de plusieurs points de fonctionnement, une évolution d'aire dépendant de la puissance d'une unité fonctionnelle et ayant un caractère de modèle multidimensionnel et que de telles évolutions d'aire sont déterminées à des intervalles de temps et qu'elles sont comparées à celles précédemment déterminées.

11. Procédé selon la revendication 10, **caractérisé en ce que** la distance des évolutions d'aire à un point de fonction-

nement prédéterminé ou le volume s'étendant entre les aires est prise comme mesure pour le changement de rendement, notamment pour une dégradation du rendement.

12. Procédé selon la revendication 11, **caractérisé en ce qu'**il est utilisé, pour déterminer l'évolution d'aire sur la base des points de fonctionnement, un filtre de Kalman.

13. Groupe motopompe à pompe centrifuge avec un moteur électrique et une pompe centrifuge entraînée par celui-ci, **caractérisé en ce qu'**il est prévu un dispositif de surveillance de la caractéristique de puissance d'au moins une unité fonctionnelle du groupe qui fonctionne selon un procédé selon l'une des revendications précédentes.

14. Groupe moto-compresseur avec un moteur électrique et une pompe de refoulement entraînée par celui-ci, **caractérisé en ce qu'**il est prévu un dispositif de surveillance de la caractéristique de puissance d'au moins une unité fonctionnelle du groupe, qui fonctionne selon un procédé selon l'une des revendications précédentes.

15. Groupe réfrigérant avec un moteur électrique, avec une pompe de refoulement entraînée par celui-ci, avec un évaporateur et avec un condenseur, **caractérisé en ce qu'**il est prévu un dispositif de surveillance de la caractéristique de puissance d'au moins une unité fonctionnelle du groupe, qui fonctionne selon un procédé selon l'une des revendications précédentes.

16. Installation de chauffage avec un brûleur et avec un circuit d'eau conçu pour être chauffé par celui-ci, **caractérisé en ce qu'**il est prévu un dispositif de surveillance de la caractéristique de puissance d'au moins une unité fonctionnelle de l'installation, qui fonctionne selon un procédé selon l'une des revendications précédentes.

17. Groupe ou installation selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le dispositif commence automatiquement, après un temps prédéterminé après la mise en fonctionnement du groupe ou de l'installation, à saisir et stocker les grandeurs essentielles pour déterminer le rendement.

18. Groupe ou installation selon la revendication 17, **caractérisé en ce que** le dispositif comprend une mémoire de données de mesure dans laquelle sont stockées au moins les grandeurs saisies au début du mesurage ou des grandeurs qui en sont dérivées.

Fig. 1

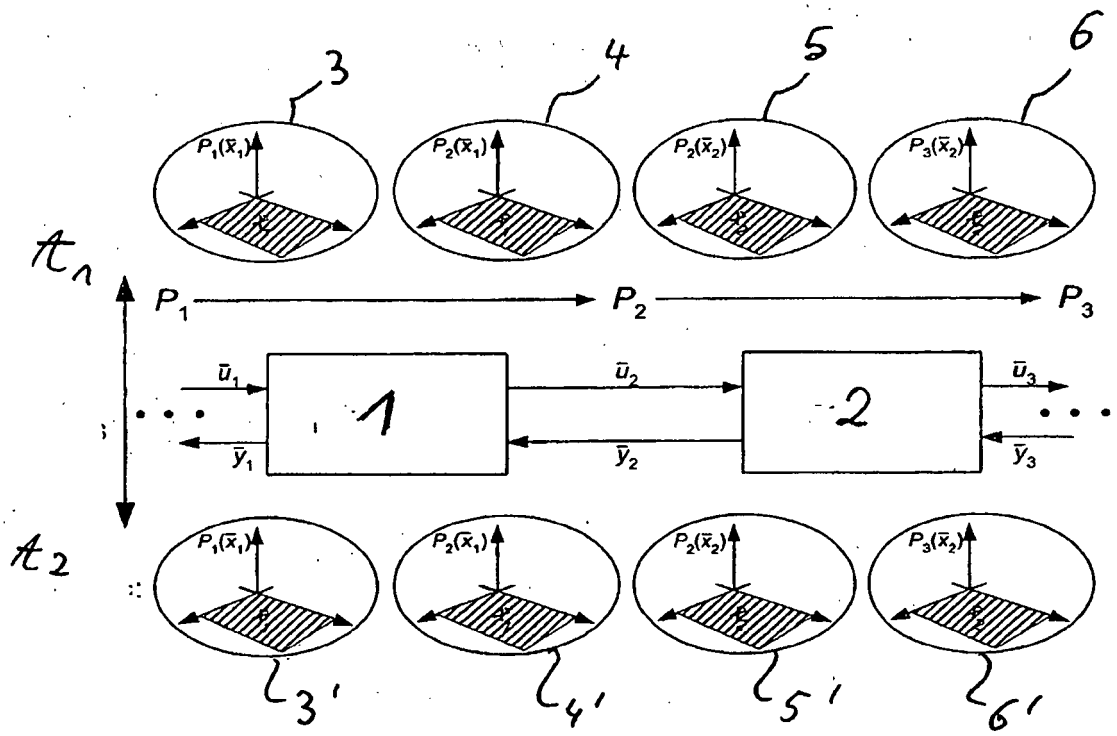

3
4
5
6
$P_1(\bar{x}_1)$
$P_2(\bar{x}_1)$
$P_2(\bar{x}_2)$
$P_3(\bar{x}_2)$
A_1
P_1
P_2
P_3
$\bar{u}_1$
$\bar{u}_2$
$\bar{u}_3$
1
2
$\bar{y}_1$
$\bar{y}_2$
$\bar{y}_3$
A_2
3'
4'
5'
6'

Fig. 2a

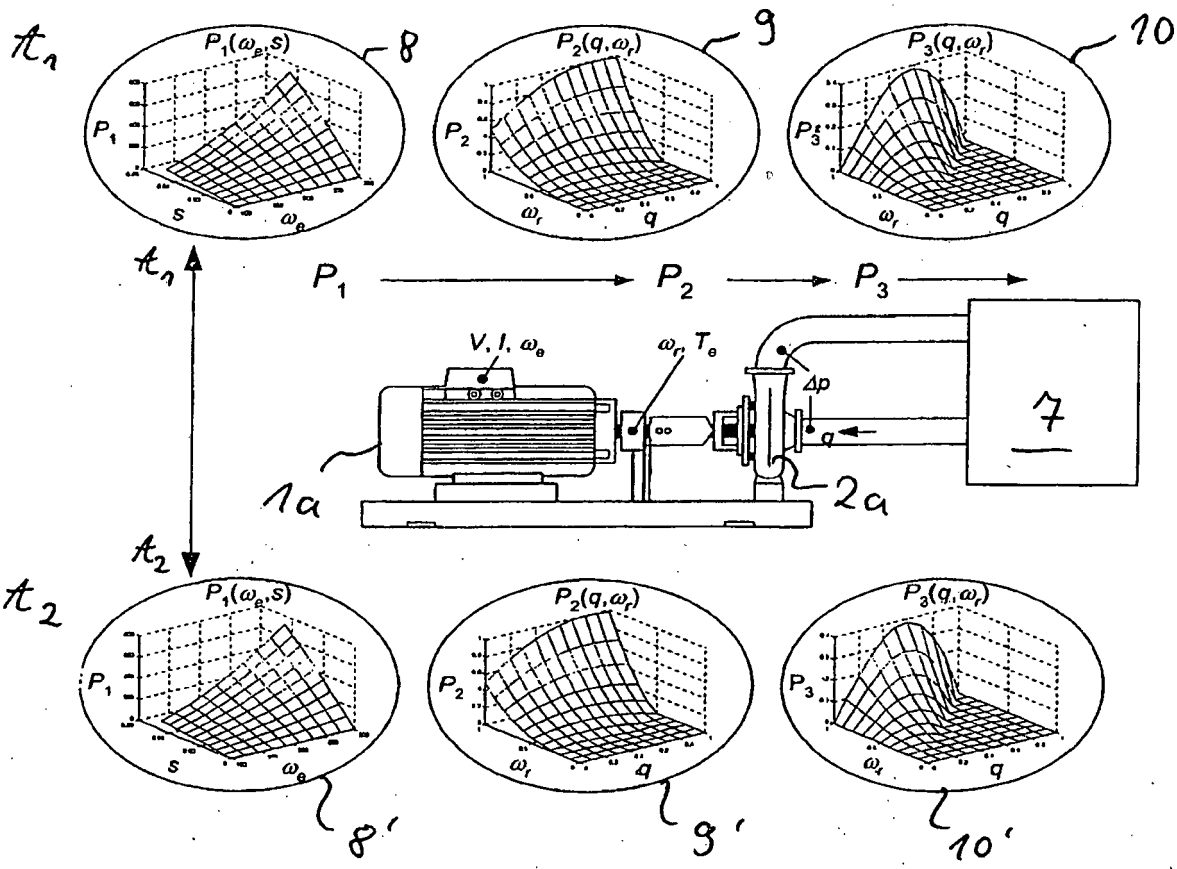

t_1
$P_1(\omega_e, s)$
8
$P_2(q, \omega_r)$
9
$P_3(q, \omega_r)$
10
P_1
P_2
P_3
t_1
P_1
P_2
P_3
V, I, ω_e
ω_r, T_e
Δp
q
7
1a
2a
t_2
t_2
$P_1(\omega_e, s)$
$P_2(q, \omega_r)$
$P_3(q, \omega_r)$
8'
9'
10'

Fig. 2b

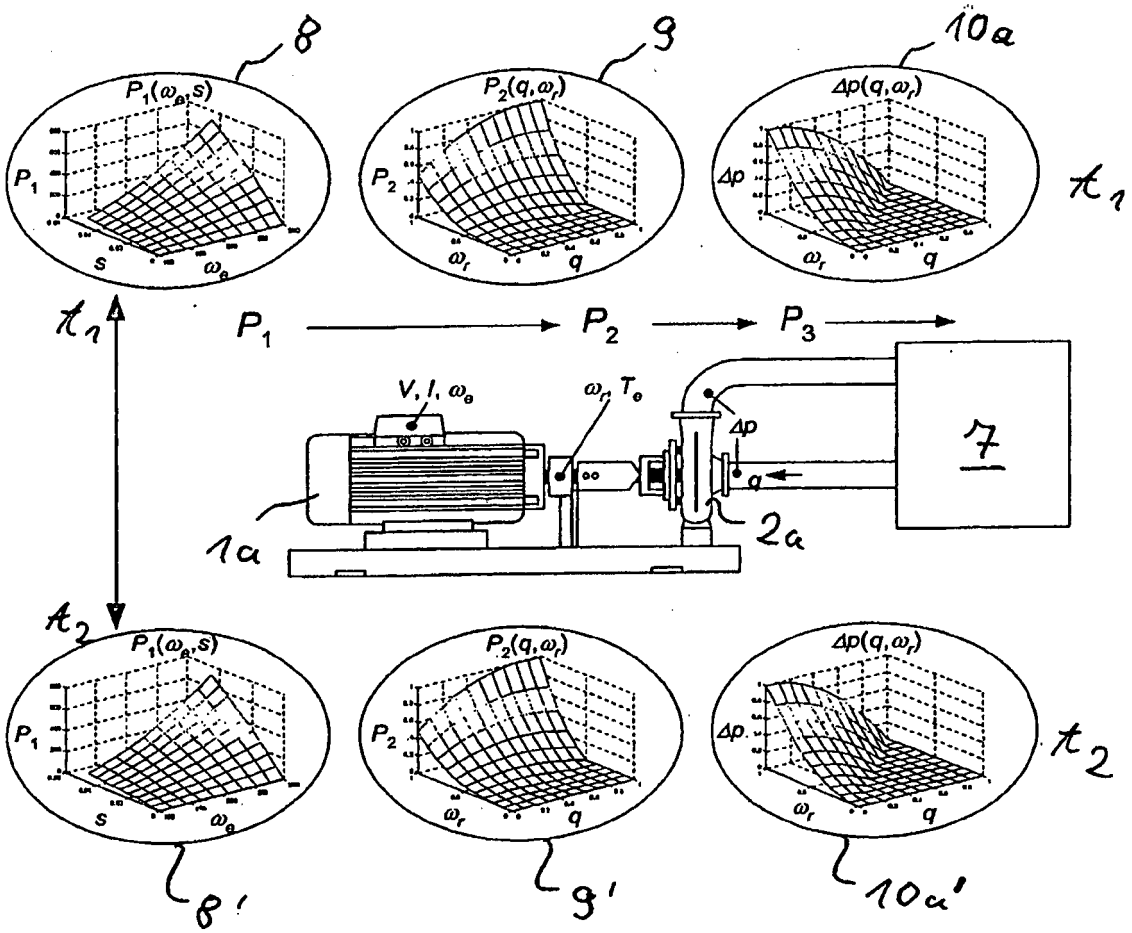

8
9
10a
$P_1(\omega_e, s)$
$P_2(q, \omega_r)$
$\Delta p(q, \omega_r)$
t_1
P_1
P_2
P_3
V, I, ω_e
ω_r, T_e
Δp
q
7
1a
2a
t_2
8'
9'
10a'

Fig. 2c

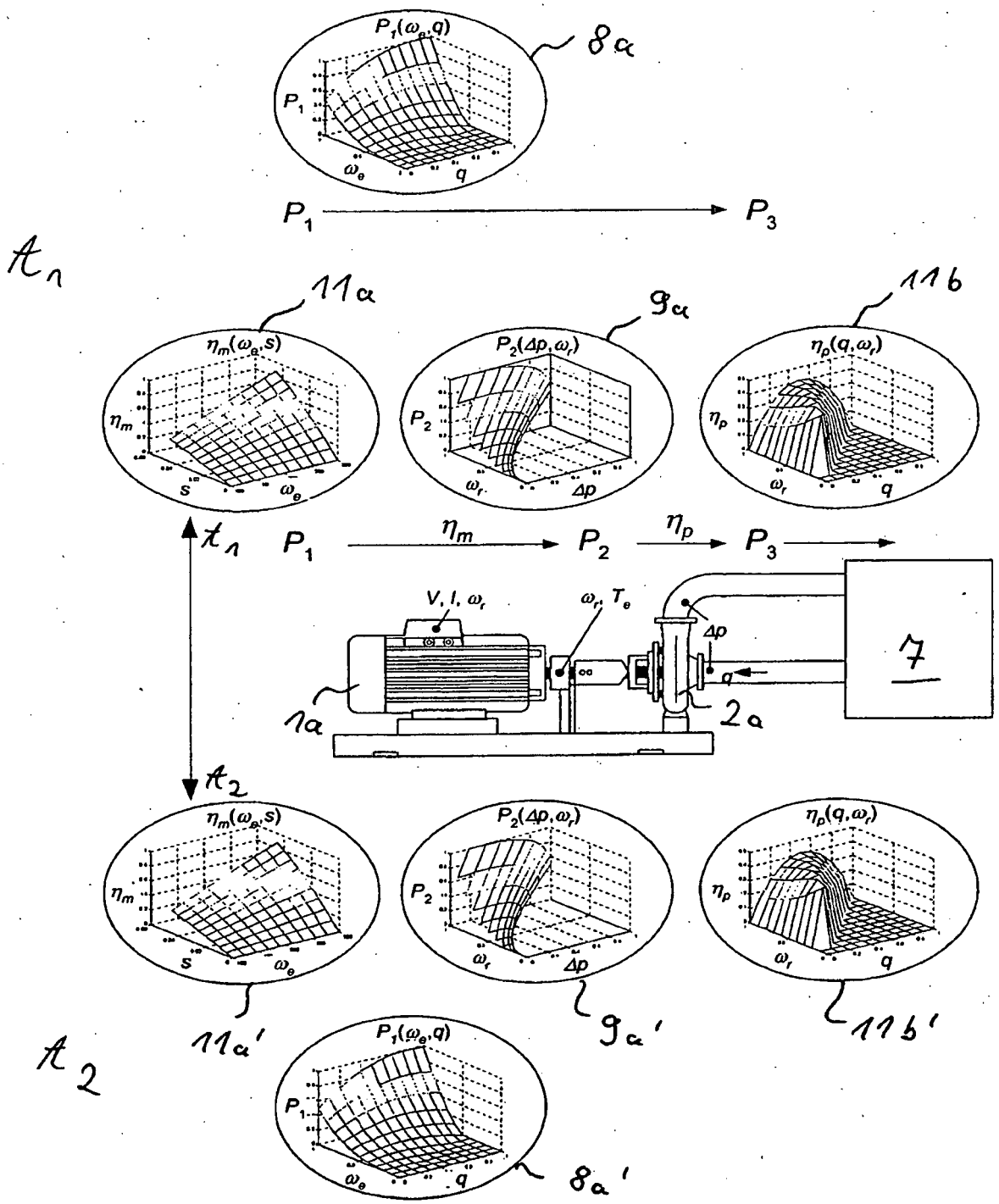

$P_1(\omega_e, q)$
8a
P_1
ω_e
q
P_1
P_3
A_1
11a
$\eta_m(\omega_e, s)$
η_m
s
ω_e
9a
$P_2(\Delta p, \omega_r)$
P_2
ω_r
Δp
11b
$\eta_p(q, \omega_r)$
η_p
ω_r
q
A_1
P_1
η_m
P_2
η_p
P_3
V, I, ω_r
ω_r, T_e
Δp
q
7
1a
2a
A_2
$\eta_m(\omega_e, s)$
$P_2(\Delta p, \omega_r)$
$\eta_p(q, \omega_r)$
11a'
9a'
11b'
A_2
$P_1(\omega_e, q)$
8a'

Fig. 3

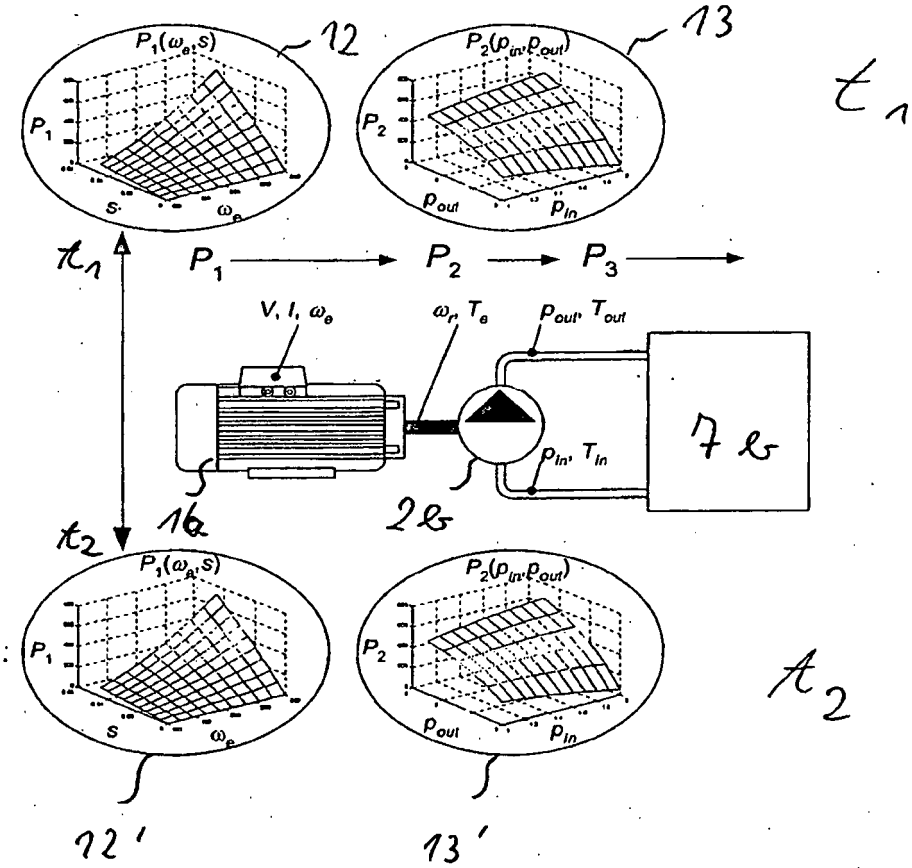

P1(ωe, s)
12
P2(pin, pout)
13
t1
P1
s
ωe
P2
pout
pin
t1
P1
P2
P3
V, I, ωe
ωr, Te
pout, Tout
pin, Tin
7e
16e
2e
t2
P1(ωe, s)
P2(pin, pout)
12'
13'
t2

Fig. 4

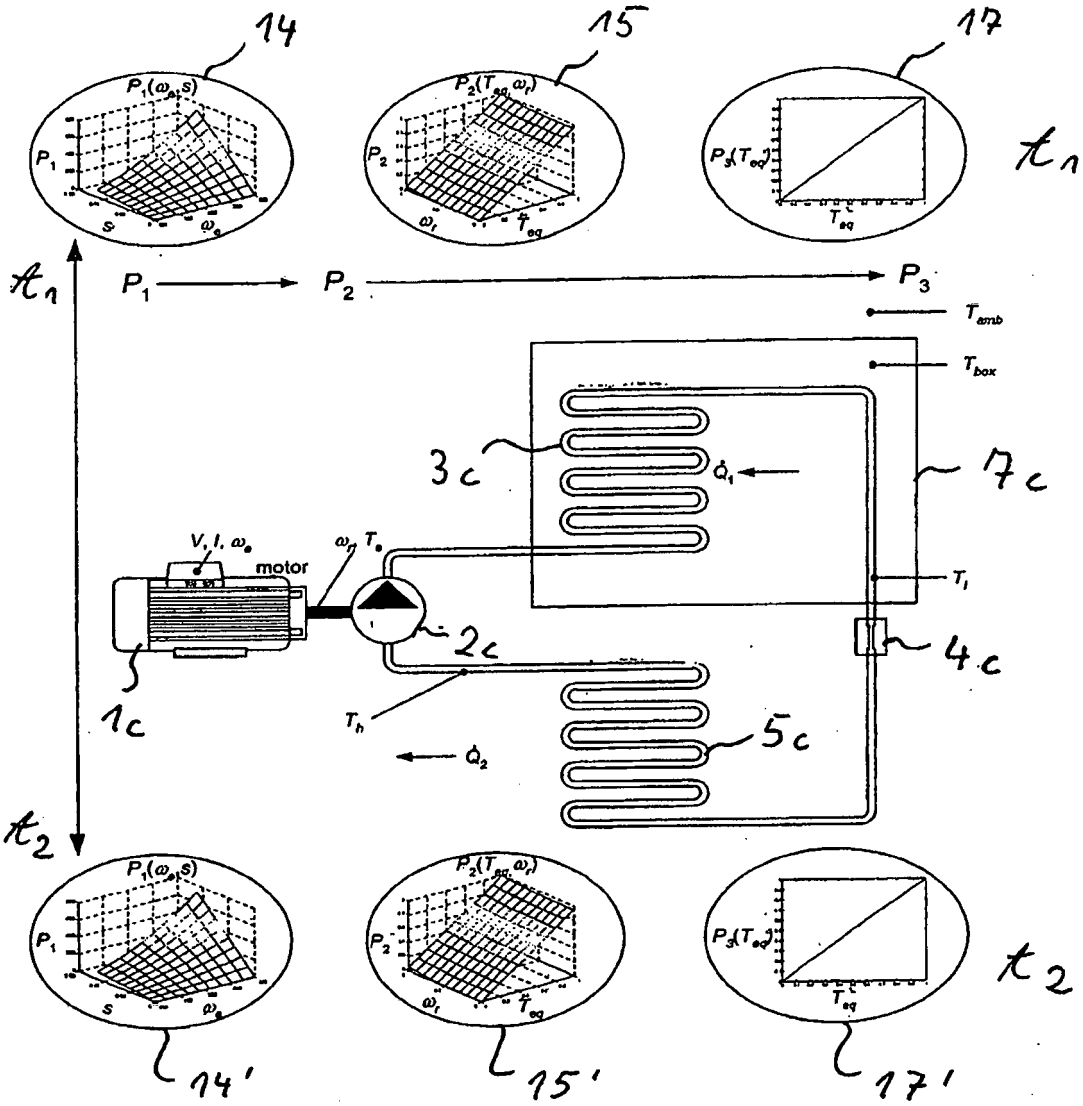
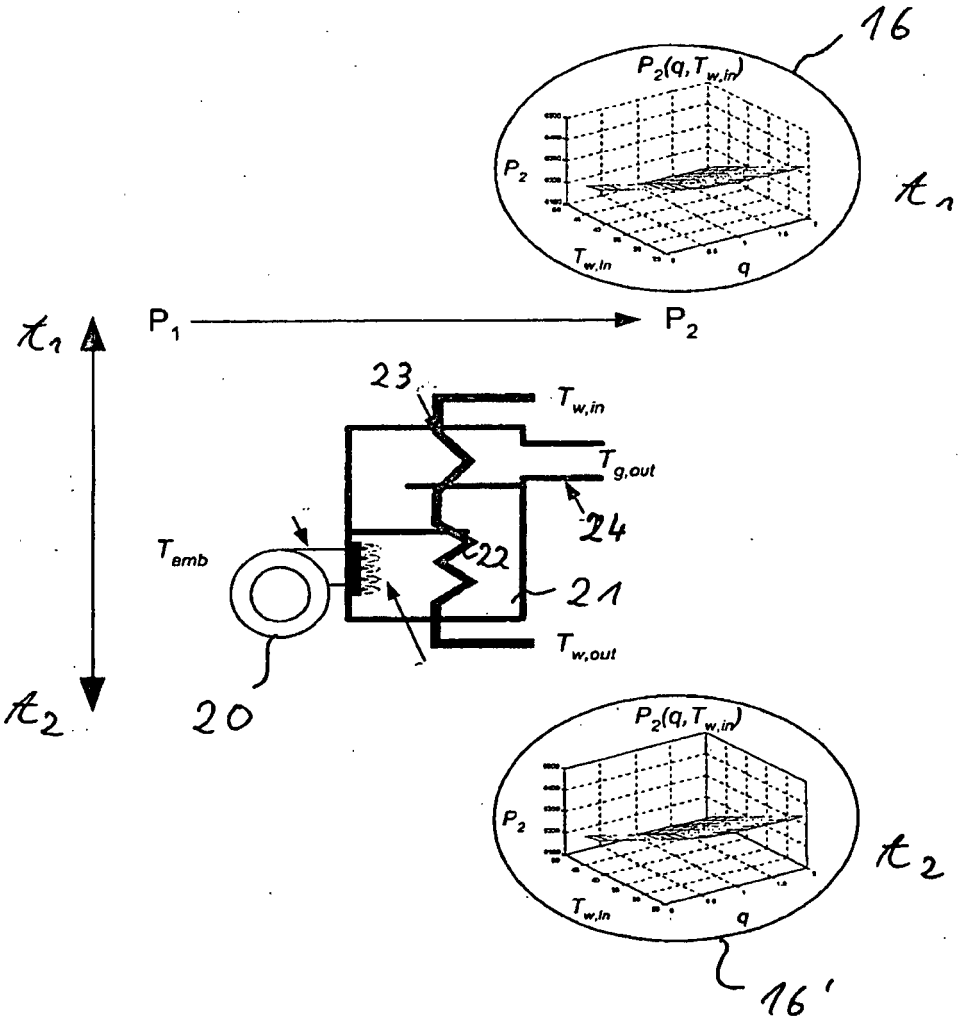

14
15
17
t1
P1
P2
P3
Tamb
Tbox
3c
7c
V, I, ωe
motor
ωr Te
2c
4c
1c
Th
5c
t2
14'
15'
17'

Fig. 5


16
$P_2(q, T_{w,in})$
P_2
$T_{w,in}$
q
t_1
t_1
P_1
P_2
23
$T_{w,in}$
$T_{g,out}$
24
T_{emb}
22
21
$T_{w,out}$
t_2
20
$P_2(q, T_{w,in})$
P_2
$T_{w,in}$
q
t_2
16'

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 102007009301 A **[0004]**
- EP 1564411 A **[0005]**
- EP 1564411 A1 **[0057]**