



Europäisches  
Patentamt  
European  
Patent Office  
Office européen  
des brevets



(11)

**EP 2 469 047 B1**

(12)

## **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des  
Hinweises auf die Patenterteilung:  
**20.04.2016 Patentblatt 2016/16**

(51) Int Cl.:  
**F01K 25/10 (2006.01)**      **F01K 13/02 (2006.01)**  
**F01D 17/08 (2006.01)**

(21) Anmeldenummer: **10016063.9**

(22) Anmeldetag: **23.12.2010**

(54) **Wärmekraftwerk sowie Verfahren zur Steuerung, Regelung und/oder Überwachung einer Vorrichtung mit einer Expansionsmaschine**

Thermal power plant and method for control, regulation, and/or monitoring of a system including an expansion device

Centrale thermique et procédé de contrôle, régulation, et/ou surveillance d'un système comprenant une machine d'expansion

(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**

- **Schuster, Andreas**  
85747 Garching (DE)
- **Sichert, Andreas**  
85747 Garching (DE)

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:

**27.06.2012 Patentblatt 2012/26**

(74) Vertreter: **Grünecker Patent- und Rechtsanwälte**  
**PartG mbB**  
**Leopoldstraße 4**  
**80802 München (DE)**

(73) Patentinhaber: **Orcan Energy AG**

**81379 München (DE)**

(72) Erfinder:

- **Aumann, Richard**  
85747 Garching (DE)

(56) Entgegenhaltungen:

- |                        |                            |
|------------------------|----------------------------|
| <b>WO-A1-01/92689</b>  | <b>WO-A2-2007/008225</b>   |
| <b>US-A- 4 549 503</b> | <b>US-A- 4 827 429</b>     |
| <b>US-A- 5 003 782</b> | <b>US-A1- 2003 213 245</b> |

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 eingereicht, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

## Beschreibung

### Gebiet der Erfindung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft die Steuerung oder Regelung und/oder Überwachung einer Vorrichtung mit einer Expansionsmaschine, der Frischdampf eines Arbeitsmediums zugeführt wird, der in der Expansionsmaschine zu Abdampf expandiert wird.

### Stand der Technik

**[0002]** Der Betrieb von Expansionsmaschinen, wie z. B. Dampfturbinen und mit Hilfe des Organic Rankine Cycle (ORC)-Verfahrens zur Erzeugung elektrischer Energie durch den Einsatz organischer Medien, beispielsweise organischer Medien mit niedriger Verdampfungstemperatur, die bei gleichen Temperaturen verglichen mit Wasser als Arbeitsmedium im allgemeinen höhere Verdampfungsdrücke aufweisen, ist im Stand der Technik bekannt. ORC-Anlagen stellen eine Realisierung des Clausius-Rankine-Kreisprozesses dar, in dem beispielsweise prinzipiell über adiabatische und isobare Zustandsänderungen eines Arbeitsmediums elektrische Energie gewonnen wird. Über Verdampfung, Expansion und anschließende Kondensation des Arbeitsmediums wird hierbei mechanische Energie gewonnen und in elektrische Energie gewandelt. Prinzipiell wird das Arbeitsmedium durch eine Speisepumpe auf Betriebsdruck gebracht, und es wird ihm in einem Wärmeübertrager Energie in Form von Wärme, die durch eine Verbrennung oder einen Abwärmestrom zur Verfügung gestellt wird, zugeführt. Vom Verdampfer aus strömt das Arbeitsmedium über ein Druckrohr zu einer ORC-Turbine, wo es auf einen niedrigeren Druck entspannt wird. Im Anschluss strömt der entspannte Arbeitsmediumdampf durch einen Kondensator, in dem ein Wärmeaustausch zwischen dem dampfförmigen Arbeitsmedium und einem Kühlmedium stattfindet, wonach das auskondensierte Arbeitsmedium durch eine Speisepumpe zu dem Verdampfer in einem Kreisprozess zurückgeführt wird.

**[0003]** In der WO 01/92689 A1 wird ein Verfahren zum Betrieb einer Dampfturbine beschrieben, in dem ein Massenstrom basierend auf der Messung einer Enthalpiedifferenz an Messstellen vor und nach der Turbine geregelt wird, wobei eine Messung der Temperatur vor und nach der Turbine erfolgt.

**[0004]** In der US 4 827 429 A wird ein Verfahren zum Bestimmen einer Dampftemperatur und eines Turbinenwirkungsgrads beschrieben.

**[0005]** In der WO 2007/008225 A2 wird eine wärmeaktivierte Wärmepumpensystem mit integriertem Expander/Kompressor und Regenerator, der zwei verschiedene Dampfströme liefert, beschrieben.

**[0006]** Die genaue Überwachung und Steuerung der Expansionsmaschine ist für den effizienten Betrieb unerlässlich und stellt, je nach Arbeitsmedium und thermodynamischen Parametern desselben, eine besondere Herausforderung dar. Hierbei ist die Bestimmung der physikalischen Parameter des der Expansionsmaschine zugeführten Frischdampfes des Arbeitsmediums von besonderer Bedeutung. Herkömmlich werden die Frischdampfparameter, wie die Frischdampfentropie und Frischdampfenthalpie, als Funktionen der ermittelten Temperatur und/oder des ermittelten Drucks des Frischdampfs bestimmt. Bei ORC-Anlagen kann es jedoch hinsichtlich ihres Wirkungsgrads vorteilhaft sein, dass zu Beginn der Entspannung des Arbeitsmediums in der Expansionsmaschine dieses Medium in einem Zwei-Phasen-Zustand vorliegt.

**[0007]** Wenn das Arbeitsmedium im Wärmeübertrager nur teilweise verdampft wird, lässt sich die Enthalpie nicht direkt aus dem Druck und der Temperatur des teilweise verdampften Arbeitsmediums ermitteln, weil im Nassdampfgebiet die Frischdampfenthalpie und -entropie neben Druck und / oder Temperatur auch vom Dampfgehalt abhängig ist.

**[0008]** Der Dampfgehalt lässt sich jedoch nicht ohne weiteres bestimmen. Wird andererseits die Expansionsmaschine mit einem Arbeitsmedium im überkritischen Bereich nahe dem kritischen Punkt, in dessen Umgebung sich die Dichte von Dampf und Flüssigkeit bei gleicher Temperatur asymptotisch annähern, betrieben, können die Frischdampfparameter nur mit großen Ungenauigkeiten aus Druck und/oder Temperatur bestimmt werden, da die Isobaren an dem kritischen Punkt annähernd horizontal verlaufen. In der Umgebung des kritischen Punkts führen bereits sehr kleine Temperaturänderungen zu sehr großen Enthalpie- und Entropieänderungen.

**[0009]** Es besteht somit ein Bedarf dafür und es liegt somit der vorliegenden Erfindung als Aufgabe zugrunde, die Steuerung oder Regelung bzw. Überwachung einer Expansionsmaschine, die mit einem zweiphasigen Arbeitsmedium beaufschlagt wird, auf eine verlässliche Weise derart zu steuern oder regeln, dass die oben genannten Probleme überwunden werden können.

### Beschreibung der Erfindung

**[0010]** Die oben genannte Aufgabe wird gelöst durch das Verfahren zur Steuerung oder Regelung und/oder Überwachung einer Vorrichtung mit einer Expansionsmaschine gemäß Anspruch 1, wobei der Expansionsmaschine der Frischdampf eines Arbeitsmediums zugeführt wird, der in der Expansionsmaschine zu Abdampf expandiert wird, wobei das Verfahren die Schritte umfasst:

Bestimmen zumindest eines physikalischen Parameters des Abdampfes;

Bestimmen zumindest eines physikalischen Parameters des Frischdampfes auf der Grundlage des bestimmten zumindest einen physikalischen Parameters des Abdampfes; und

Steuern oder Regeln und/oder Überwachen der Vorrichtung auf der Grundlage des zumindest einen bestimmten physikalischen Parameters des Frischdampfes. Zudem wird der isentrope Wirkungsgrad der Expansionsmaschine bestimmt und das Bestimmen des zumindest einen physikalischen Parameters des Frischdampfes erfolgt auf der Grundlage des bestimmten Wirkungsgrads der Expansionsmaschine, d.h. nach Bestimmung (beispielsweise Messung) von Parametern des Abdampfes kann bei Kenntnis des bestimmten Wirkungsgrads der Expansionsmaschine auf für die Steuerung/Regelung/Überwachung relevante Parameter geschlossen werden. Es wird also aus dem Abdampf-Zustand der Frischdampfzustand bestimmt. Hierbei wird der isentrope Wirkungsgrad der Expansionsmaschine benötigt. Da dieser jedoch von Frischdampf- und Abdampfzustand abhängt, muss iterativ vorgegangen werden.

**[0011]** Es wird ein organisches Arbeitsmedium als das Arbeitsmedium bereitgestellt, und die Expansionsmaschine wird im Rahmen eines Organic Rankine Cycle (ORC)-Verfahrens zur Erzeugung elektrischer Energie betrieben. Hierbei befindet sich der Frischdampf des organischen Arbeitsmediums im Nassdampfbereich. Als Arbeitsmedien kommen sämtliche in herkömmlichen ORC-Anlagen verwendeten "trockenen Medien", wie R245fa, "nasse" Medien, wie Ethanol oder "isentrope Medien", wie R134a, in Frage. Ebenso können synthetische Arbeitsmedien auf Silikonbasis, wie GL160, Verwendung finden. Die Vorrichtung kann ein Dampfkraftwerk, insbesondere ein Organic Rankine Cycle - Dampfkraftwerk, oder ein Bestandteil desselben sein. Die ORC-Anlage selbst kann beispielsweise eine geothermische oder solarthermische Anlage sein oder auch die Verbrennung fossiler Brennstoffe als Wärmequelle aufweisen.

**[0012]** Es liegt eine Besonderheit der vorliegenden Erfindung darin, dass Parameter (Größen), die für den Abdampf gewonnen werden, benutzt werden, um Parameter (Größen) des Frischdampfes zu bestimmen, die für die Steuerung/Regelung oder Überwachung der Vorrichtung von Belang sind. Hierdurch werden die oben genannten Probleme der technisch nicht möglichen oder ungenauen Bestimmung der Frischdampfparameter auf Grundlage von Temperatur und Druck, besonders im Nassdampfgebiet, umgangen bzw. vermieden.

**[0013]** Die Vorrichtung kann insbesondere Mittel zur Zuführung des Frischdampfes zur Expansionsmaschine umfassen und die Regelung/Steuerung/Überwachung kann insbesondere die Regelung/Steuerung/Überwachung des Frischdampfes zur Expansionsmaschine umfassen. Die Vorrichtung kann insbesondere Bestandteil eines Dampfkraftwerks oder ein Dampfkraftwerk sein, in dem das Arbeitsmedium nach Passieren eines Verdampfers der Expansionsmaschine, die insbesondere eine Turbine sein kann, zugeführt wird. Beispielsweise kann das die Vorrichtung den Verdampfer sowie Zuführ-

einrichtungen zu dem Verdampfer und zu der Expansionsmaschine umfassen. Die Vorrichtung kann weiterhin einen Kondensator zum Verflüssigen des Abdampfes und eine Speisepumpe zum Zuführen des verflüssigten Arbeitsmediums zu dem Verdampfer umfassen. Die Steuerung/Regelung kann sich also insgesamt auf die Steuerung/Regelung des Transports des Arbeitsmediums in der Vorrichtung beziehen, wobei insbesondere die Massenstromrate des Arbeitsmediums, beispielsweise durch entsprechende Steuerung der Speisepumpe, gesteuert/geregelt werden kann. Ebenso kann der Betrieb der Expansionsmaschine und/oder des Verdampfers gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren auf der Grundlage des zumindest einen bestimmten physikalischen Parameters des Frischdampfes gesteuert/geregelt werden.

**[0014]** Wie erwähnt handelt es sich bei dem Arbeitsmedium um ein organisches Medium, dass im Rahmen eines Organic Rankine Cycle (ORC) - Prozesses in einem Verdampfer verdampft wird und dann der Expansionsmaschine zugeführt wird. Das erfindungsgemäße Verfahren ist für ORC-Anlagen von besonderer Bedeutung, da hier das Arbeitsmedium vorteilhafterweise der Expansionsmaschine zweiphasig oder insbesondere im überkritischen Bereich, jedoch nahe dem kritischen Punkt, in dessen Umgebung sich die Dichte der flüssigen Phase und des gasförmigen Phase des Arbeitsmediums asymptotisch annähern, zugeführt wird.

**[0015]** In diesem Zusammenhang kann das Verfahren den Schritt des Bestimmens des an der Expansionsmaschine anliegenden Druckverhältnisses des Arbeitsmediums und des Massenstroms des Arbeitsmediums umfassen. In diesem Fall erfolgt das Bestimmen des isentropen Wirkungsgrads der Expansionsmaschine auf der Grundlage des bestimmten anliegenden Druckverhältnisses des Arbeitsmediums und Massenstroms des Arbeitsmediums. Je nach Ausbildung der Expansionsmaschine kann der isentrope Wirkungsgrad von der Drehzahl der Expansionsmaschine abhängen. Somit kann das Verfahren weiterhin den Schritt des Bestimmens der Drehzahl der Expansionsmaschine umfassen, und in diesem Fall erfolgt das Bestimmen des isentropen Wirkungsgrads der Expansionsmaschine auf der Grundlage der bestimmten Drehzahl der Expansionsmaschine. Das ist besonders vorteilhaft, wenn es sich bei der Expansionsmaschine um eine Kolbenexpansionsmaschine, einen Scrollexpander oder einen Schraubenexpander handelt.

**[0016]** In jedem der genannten Beispiele kann das Verfahren das Modellieren des Betriebs der Expansionsmaschine mit dem Arbeitsmedium auf der Grundlage thermodynamischer Gleichungen und empirisch bestimmter Parametergrößen umfassen und der Wirkungsgrad der Expansionsmaschine auf der Grundlage des Ergebnisses des Modellierens des Betriebs der Expansionsmaschine bestimmt werden.

**[0017]** Der zumindest eine bestimmte physikalische Parameter des Frischdampfes, der für die Steuerung/Re-

gelung/Überwachung der Vorrichtung verwendet wird, kann die (spezifische) Enthalpie und/oder (spezifische) Entropie und/oder das Volumenverhältnis von gasförmiger zu flüssiger Phase und/oder das Dichteverhältnis von gasförmiger zu flüssiger Phase des Frischdampfs umfassen. Insbesondere kann auf den Dampfgehalt als Quotient aus Masse des Dampfanteils und Gesamtmasse und mithilfe dieser auf die Entropie/Enthalpie desselben geschlossen werden. Somit werden für die Steuerung/Regelung/Überwachung besonders geeignete Parameter für den Frischdampf gewonnen.

**[0018]** Der zumindest eine bestimmte physikalische Parameter des Abdampfes kann die Temperatur und/oder den Druck desselben umfassen. Insbesondere kann der Schritt des Bestimmens der Temperatur des Frischdampfes auf der Grundlage der bestimmten Temperatur und des bestimmten Drucks des Abdampfes erfolgen.

**[0019]** Gemäß einer Weiterbildung umfasst das erfindungsgemäße Verfahren den Schritt des Bestimmens (beispielsweise des Messens) des Drucks des Frischdampfes, der von dem zumindest einen auf der Grundlage des bestimmten zumindest einen physikalischen Parameters des Abdampfes bestimmten physikalischen Parameter des Frischdampfes verschieden ist, und es wird der zumindest eine physikalische Parameter des Frischdampfes auf der Grundlage des (von diesem Parameter verschiedenen) bestimmten Drucks des Frischdampfes bestimmt.

**[0020]** In den genannten obigen Beispielen können die Parameter des Abdampfes durch Messen an entsprechenden Messstellen der Vorrichtung bestimmt werden.

**[0021]** Weiterhin stellt die vorliegende Erfindung zur Lösung der oben genannten Aufgabe ein Wärmekraftwerk gemäß dem unabhängigen Anspruch 10 bereit, das umfasst:

eine Expansionsmaschine, die im Rahmen eines Organic Rankine Cycle - Verfahrens zur Erzeugung elektrischer Energie betreibbar ist, der Frischdampf eines organischen Arbeitsmediums im Nassdampfbereich zugeführt wird, der in der Expansionsmaschine zu Abdampf expandiert wird; und

eine Steuerung oder Regelung;

wobei

die Steuerung oder Regelung dazu ausgebildet ist, zumindest einen physikalischen Parameter des Abdampfes zu bestimmen;

zumindest einen physikalischen Parameter des Frischdampfes auf der Grundlage des bestimmten zumindest einen physikalischen Parameters des Abdampfes zu bestimmen; und

das Wärmekraftwerk auf der Grundlage des zumindest einen bestimmten physikalischen Parameters des Frischdampfes zu steuern oder regeln und/oder zu überwachen;

wobei

die Steuerung oder Regelung dazu ausgebildet ist, den isentropen Wirkungsgrads der Expansionsmaschine zu bestimmen und den zumindest einen physikalischen Parameter des Frischdampfes auf der Grundlage des bestimmten Wirkungsgrads der Expansionsmaschine zu bestimmen.

**[0022]** Sämtliche Spezifizierungen hinsichtlich des Arbeitsmediums und der Art der physikalischen Parameter sowie der Bestimmung derselben, wie sie in den obigen Beispielen für das erfindungsgemäße Verfahren beschrieben sind, können in Weiterbildungen des Wärmekraftwerks realisiert sein. Insbesondere kann das Wärmekraftwerk ein ORC-Kraftwerk sein, in dem ein organisches Arbeitsmedium in einem Wärmeübertrager verdampft wird und dann der Expansionsmaschine zugeführt wird, um nach der Expansion durch einen Kondensator verflüssigt zu werden und im Rahmen eines ORC-Kreislaufes durch eine Speisepumpe dem Wärmeübertrager wieder zugeführt zu werden. Der Wärmeübertrager kann hierbei durch ein Rauchgas beaufschlagt werden, das beispielsweise durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe entsteht.

**[0023]** Weitere Merkmale und beispielhafte Ausführungsformen sowie Vorteile der vorliegenden Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnungen näher erläutert. Es versteht sich, dass die Ausführungsformen nicht den Bereich der vorliegenden Erfindung erschöpfen, welche ausschließlich durch die anhängenden unabhängigen Ansprüche definiert ist.

**[0024]** Es versteht sich weiterhin, dass einige oder sämtliche der im Weiteren beschriebenen Merkmale auch auf andere Weise miteinander kombiniert werden können, wobei ein erfindungsgemäßes Verfahren oder

Wärmekraftwerk mindestens jeweils die Merkmale der entsprechenden unabhängigen Ansprüche umfasst.

Figur 1 stellt Messstellen zur Bestimmung von physikalischen Parametern dar, die zur Bestimmung hier von verschiedenen physikalischen Parameter des Frischdampfes gemäß einem Beispiel für das erfindungsgemäße Verfahren verwendet werden.

Figur 2 veranschaulicht die Modellierung einer Expansionsmaschine zur Bestimmung des Wirkungsgrads derselben und schließlich von Frischdampfparametern aus bestimmten Abdampfparametern gemäß einem Beispiel für das erfindungsgemäße Verfahren.

**[0025]** Gemäß der vorliegenden Erfindung wird zumindest ein physikalischer Parameter des Abdampfes bestimmt, um mit seiner Hilfe physikalische Parameter des Frischdampfes zu bestimmen. Wie es in Figur 1 gezeigt ist, werden gemäß einer Ausführungsform der Druck und die Temperatur des Abdampfes an Messstellen gemessen, oder aber als Information direkt aus der Leistungselektronik / MSR-Technik entnommen. Ein Arbeitsmedi-

um wird in Form von Frischdampf 1 einer Expansionsmaschine 2, beispielsweise einer Turbine, zugeführt, und es wird die durch die Expansion des Frischdampfes des Arbeitsmediums gewonnenen mechanischen Energie durch einen Generator in elektrische Energie 3 gewandelt.

**[0026]** In Figur 1 sind zudem Messstellen zur Messung verschiedener Parameter gezeigt. Zum einen wird gemäß dem gezeigten Beispiel der Druck des Frischdampfes 1 an einer Frischdampfdruckmessstelle 4 gemessen. Die Abdampfdruckmessstelle 5 und die Abdampftemperaturmessstelle 6 stellen den Druck bzw. die Temperatur des expandierten Abdampfes 1' des Arbeitsmediums bereit. Zudem wird die Drehzahl der Expansionsmaschine an der Messstelle 7 gemessen. Aus den derart erhaltenen Messdaten können der isentrope Wirkungsgrad der Expansionsmaschine und zur Steuerung oder Regelung, beispielsweise der Zufuhr des Frischdampfes zur Expansionsmaschine, benötigte physikalische Parameter des Frischdampfes bestimmt werden. Beispielsweise können die Enthalpie oder das Volumenverhältnis von gasförmiger zu flüssiger Phase und/oder der Dampfgehalt (Quotient des Masse des Dampfanteils und der Gesamtmasse) oder auch das Dichteverhältnis von gasförmiger zu flüssiger Phase des Frischdampfs mithilfe der an den Messstellen 4 bis 7 gemessenen Parameter bestimmt werden. Die Bestimmung der physikalischen Parameter des Frischdampfes erlaubt insbesondere die Steuerung oder Regelung des Massenstroms des Arbeitsmediums zu einem Wärmeübertrager (Verdampfer) derart, dass am Ende des Expansionsprozesses gerade noch Sattdampf erreicht wird.

**[0027]** In Figur 2 wird ein erfindungsgemäßes Beispiel für die halb-empirische Modellierung einer Expansionsmaschine veranschaulicht, durch die die Bestimmung relevanter physikalischer Parameter des Frischdampfes ausgehend von der Bestimmung physikalischer Parameter des Abdampfes beispielhaft ermöglicht wird. Hierzu wird die Strömung des Arbeitsmediums durch die Expansionsmaschine in unterschiedliche Arten der Zustandsänderung desselben, die durch unterschiedliche Parameter bestimmt sind, unterteilt.

**[0028]** In dem gezeigten Beispiel kann die Expansionsmaschine mithilfe von sieben empirisch zu bestimmenden Parametern modelliert werden.

**[0029]** Zunächst erfolgt ein adiabatischer Druckverlust 10 des Frischdampfes ( $FD \rightarrow FD_1$ ) des Arbeitsmediums, das mit der Massenrate  $m_{FD}$  geliefert wird, am Einlass der Expansionsmaschine. Dieser adiabatische Druckverlust 10 ist wesentlich durch den Einlassquerschnitt bestimmt, der somit als erster empirischer Parameter bei der Modellierung Verwendung findet. Gemäß der Wärmeübertragungskapazität des Frischdampfes als zweiten empirischen Parameter erfolgt eine isobare Abkühlung ( $FD_1 \rightarrow FD_2$ ) des Arbeitsmediums. Das Arbeitsmedium erfährt dann 20 in einer ersten Stufe A eine isentrope Expansion gemäß dem eingebauten Volumenverhältnis, das als dritter empirischer Parameter zu berück-

sichtigen ist. Volumetrische arbeitende Expansionsmaschinen besitzen ein sog. eingebautes Volumenverhältnis. Es wird Dampf in einer Kammer eingeschlossen, der expandiert wird und nach dem Öffnen der Kammer ausgeschoben wird. Das Volumenverhältnis ist der Quotient aus dem Volumen des Dampfes beim Öffnen der Kammer und dem Volumen des Dampfes beim Schließen der Kammer.

**[0030]** Eine konstruktionsbedingte Nachexpansion 10 oder Rückkompression des Abdampfes ( $\rightarrow AD_2$ ) wird in einer zweiten Stufe B berücksichtigt.

**[0031]** Gemäß der Wärmeübertragungskapazität des Abdampfes als vierten empirischen Parameter kommt es sodann entweder zu einer Erwärmung oder Abkühlung 15 des expandierten Abdampfes ( $AD_2 \rightarrow AD_1$ ). Zu dem Strom des Arbeitsmediums nach der Expansion trägt auch ein Anteil des Frischdampfes nach der isobaren Abkühlung ( $FD_2$ ) bei, der als Leckagemassenstrom mit der Rate  $m_{Leakage}$  gemäß einem Leckagequerschnitt als 20 fünften empirischen Parameter an der Expansionsstufe vorbeiströmt. Für diesen Leckagemassenstrom ist der Wärmeverlust  $Q_{FD}$  über die isotherme Hülle der Expansionsmaschine gemäß der Wärmeübertragungskapazität des isobar abgekühlten Frischdampfes ( $FD_2$ ) als 25 sechsten empirischen Parameter zu berücksichtigen. Letztlich findet als siebter empirischer Parameter ein mechanisches Verlustmoment  $W_{mech}$  der Expansionsmaschine Berücksichtigung. Das Arbeitsmedium verlässt schließlich als Abdampf AD die Expansionsmaschine.

**[0032]** Zur Ermittlung der empirischen Parameter werden in relevanten Betriebsbereichen Messwerte aufgenommen. Sodann kann für unterschiedliche Drehzahlen aus dem Frischdampfdruck und den Abdampfparametern, wie sie beispielsweise gemäß Figur 1 ermittelt werden, 30 der isentrope Wirkungsgrad der Expansionsmaschine auf der Grundlage thermodynamischer Modellgleichungen, die dem Fachmann wohlvertraut sind, bestimmt werden. Mithilfe des bestimmten Wirkungsgrads kann dann auf die relevanten Frischdampfparameter, 35 wie Entropie und Enthalpie oder auch Temperatur, geschlossen werden.

**[0033]** Im Einzelnen bietet sich das folgende iterative Verfahren zur Bestimmung relevanter Frischdampfparameter an. In einem ersten Schritt werden der Druck und 40 die Temperatur des Abdampfes bestimmt, beispielsweise gemessen. Hieraus lässt sich die Entropie des Abdampfes bestimmen. In einem zweiten Schritt werden mithilfe eines Anfangswerts für den isentropen Wirkungsgrad  $\eta(1)$  Frischdampfparameter, wie der Dampfgehalt des Frischdampfes und die Entropie desselben, bestimmt. In einem dritten Schritt wird unter Verwendung 45 der Drehzahl, des Dampfgehalts des Frischdampfes sowie der Temperaturen und Drücke sowohl des Frischdampfes als auch des Abdampfes der iterierte isentropen Wirkungsgrad  $\eta(1+n)$  bestimmt. Im vierten Schritt sind 50 mithilfe des iterierten isentropen Wirkungsgrads  $\eta(1+n)$  nunmehr die neuen Werte für die Frischdampfparameter, wie der Dampfgehalt des Frischdampfes und die Entro-

pie desselben, zu bestimmen. Die Schritte 3 und 4 sind solange zu iterieren, bis eine gewünschte vorbestimmte Genauigkeit für die zu bestimmenden Frischdampfparameter erreicht worden ist.

**[0034]** Der isentrope Wirkungsgrad ist i.a. von mehreren Parametern abhängig. So kann er als Funktion der Drehzahl, der Frischdampfparameter, der Abdampfparameter aber auch der Geometrie der Expansionsmaschine, wie es dem Fachmann geläufig ist, bestimmt werden. Der isentrope Wirkungsgrad kann beispielsweise durch numerische Simulation, insbesondere strömungsmechanische Simulationsrechnungen, bestimmt werden. Alternativ kann er empirisch durch eine Ausgleichsfunktion basierend auf Messwerten oder halb-empirisch durch eine Parametrisierung von Bestimmungsgleichungen, wobei Parameter aus Messwerten generiert werden, bestimmt werden. Diese Verfahren zur Bestimmung des isentropen Wirkungsgrads sind dem Fachmann wohl bekannt.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Steuerung oder Regelung und/oder Überwachung einer Vorrichtung mit einer Expansionsmaschine (2), die im Rahmen eines Organic Rankine Cycle - Verfahrens zur Erzeugung elektrischer Energie betrieben wird, wobei der Expansionsmaschine (2) Frischdampf (1) eines organischen Arbeitsmediums im Nassdampfbereich zugeführt wird, der in der Expansionsmaschine (2) zu Abdampf expandiert wird, mit den Schritten  
Bestimmen zumindest eines physikalischen Parameters des Abdampfes;  
Bestimmen zumindest eines physikalischen Parameters des Frischdampfes (1) auf der Grundlage des bestimmten zumindest einen physikalischen Parameters des Abdampfes; und  
Steuern oder Regeln und/oder Überwachen der Vorrichtung auf der Grundlage des zumindest einen bestimmten physikalischen Parameters des Frischdampfes (1); und  
Bestimmen des isentropen Wirkungsgrads der Expansionsmaschine (2) wobei das Bestimmen des zumindest einen physikalischen Parameters des Frischdampfes (1) auf der Grundlage des bestimmten Wirkungsgrads der Expansionsmaschine (2) erfolgt.
2. Das Verfahren gemäß Anspruch 1, weiterhin den Schritt des Bestimmens des an der Expansionsmaschine (2) anliegenden Druckverhältnisses des Arbeitsmediums und des Massenstroms des Arbeitsmediums umfassend, und in dem das Bestimmen des isentropen Wirkungsgrads der Expansionsmaschine (2) auf der Grundlage des bestimmten anliegenden Druckverhältnisses des Arbeitsmediums und Massenstroms des Arbeitsmediums erfolgt.
3. Das Verfahren gemäß Anspruch 1, in dem die Expansionsmaschine (2) eine Verdrängermaschine, insbesondere eine Kolbenexpansionsmaschine, ein ScrollExpander oder ein Schraubenexpander, ist, und weiterhin den Schritt des Bestimmens der Drehzahl der Expansionsmaschine (2) umfassend, und in dem das Bestimmen des isentropen Wirkungsgrads der Expansionsmaschine (2) auf der Grundlage der bestimmten Drehzahl der Expansionsmaschine (2) erfolgt.
4. Das Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 3, den Schritt des Modellierens des Betriebs der Expansionsmaschine (2) mit dem Arbeitsmedium auf der Grundlage thermodynamischer Gleichungen und empirisch bestimpter Parametergrößen umfassend, und in dem der Wirkungsgrad der Expansionsmaschine (2) auf der Grundlage des Ergebnisses des Modellierens des Betriebs der Expansionsmaschine (2) erfolgt.
5. Das Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, in dem der zumindest eine bestimmte physikalische Parameter des Abdampfes die Temperatur und/oder den Druck des Abdampfes umfasst.
6. Das Verfahren gemäß Anspruch 5, den Schritt des Bestimmens der Temperatur des Frischdampfes (1) auf der Grundlage der bestimmten Temperatur und des bestimmten Drucks des Abdampfes umfassend.
7. Das Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, das weiterhin den Schritt des Bestimmens des Drucks des Frischdampfes (1) umfasst, der von dem zumindest einen auf der Grundlage des bestimmten zumindest einen physikalischen Parameters des Abdampfes bestimmten physikalischen Parameter des Frischdampfes (1) verschieden ist, und in dem der zumindest eine physikalische Parameter des Frischdampfes (1) auf der Grundlage des bestimmten Drucks des Frischdampfes (1) erfolgt.
8. Das Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, in dem der zumindest eine bestimmte physikalische Parameter des Frischdampfes (1) die Enthalpie und/oder Entropie und/oder das Volumenverhältnis von gasförmiger zu flüssiger Phase und/oder der Dampfgehalt und/oder das Dichteverhältnis von gasförmiger zu flüssiger Phase des Frischdampfs umfasst.
9. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, in dem die Vorrichtung ein Dampfkraftwerk, insbesondere ein Organic Rankine Cycle - Dampfkraftwerk, oder ein Bestandteil desselben ist.
10. Wärmekraftwerk, umfassend

eine Expansionsmaschine (2), die im Rahmen eines Organic Rankine Cycle - Verfahrens zur Erzeugung elektrischer Energie betreibbar ist, der Frischdampf (1) eines organischen Arbeitsmediums im Nassdampfbereich zugeführt wird, der in der Expansionsmaschine (2) zu Abdampf expandiert wird; und eine Steuerung oder Regelung;

wobei

die Steuerung oder Regelung dazu ausgebildet ist, zumindest einen physikalischen Parameter des Abdampfes zu bestimmen; zumindest einen physikalischen Parameter des Frischdampfes (1) auf der Grundlage des bestimmten zumindest einen physikalischen Parameters des Abdampfes zu bestimmen; und

das Wärmekraftwerk auf der Grundlage des zumindest einen bestimmten physikalischen Parameters des Frischdampfes (1) zu steuern oder regeln und/oder zu überwachen;

wobei

die Steuerung oder Regelung dazu ausgebildet ist, den isentropen Wirkungsgrads der Expansionsmaschine (2) zu bestimmen und den zumindest einen physikalischen Parameter des Frischdampfes (1) auf der Grundlage des bestimmten Wirkungsgrads der Expansionsmaschine (2) zu bestimmen.

## Claims

1. Method for open-loop controlling or closed-loop controlling and / or monitoring a device having an expansion engine (2) operated within the framework of an Organic Rankine Cycle process for generating electrical energy, where said expansion engine (2) is supplied with live steam (1) of an organic working medium in the wet steam region that is expanded to exhaust steam in said expansion engine, comprising the steps of  
determining at least one physical parameter of said exhaust steam;  
determining at least one physical parameter of said live steam (1) based on the determined at least one physical parameter of said exhaust steam; and  
open-loop controlling or closed-loop controlling and / or monitoring said device based on said at least one determined physical parameter of said live steam (1); and  
determining the isentropic degree of efficiency of said expansion engine (2), and  
wherein said at least one physical parameter of said live steam (1) is determined based on said determined degree of efficiency of said expansion engine.  
5
2. Method according to claim 2, further comprising the step of determining the compression ratio of said working medium applied to said expansion engine (2) and the mass flow of said working medium, and  
55
3. Method according to claim 1, in which said expansion engine (2) is a displacement engine, in particular a piston expansion engine, a scroll expander or a screw expander, and further comprising the step of determining the rotational speed of said expansion engine (2), and in which the isentropic degree of efficiency of said expansion engine (2) is determined based on said determined rotational speed of said expansion engine (2).  
10
4. Method according to one of the claims 1 to 3, comprising the step of modeling the operation of said expansion engine (2) with said working medium based on thermodynamic equations and empirically determined parameters values, and in which said degree of efficiency of said expansion engine (2) is determined based on the result of modeling the operation of said expansion engine (2).  
15
5. Method according to one of the preceding claims, in which said at least one determined physical parameter of said exhaust steam comprises the temperature and / or the pressure of said exhaust steam.  
20
6. Method according to claim 5, comprising the step of determining the temperature of said live steam (1) based on the determined temperature and the determined pressure of said exhaust steam.  
25
7. Method according to one of the preceding claims, further comprising the step of determining the pressure of said live steam (1) which differs from said at least one determined physical parameter of said live steam being determined based on said at least one determined physical parameter of said exhaust steam, and in which said at least one physical parameter of said live steam (1) is determined based on said determined pressure of said live steam (1).  
30
8. Method according to one of the preceding claims, in which said at least one determined physical parameter of said live steam (1) comprises the enthalpy and / or the entropy and / or the volume ratio of the gaseous to the liquid phase and / or the steam content and / or the density ratio of the gaseous to the liquid phase of said live steam.  
35
9. Method according to one of the preceding claims, in which said device is a steam power plant, in particular an Organic Rankine Cycle steam power plant, or a component thereof.  
40

in which said isentropic degree of efficiency of said expansion engine (2) is determined based on the determined applied compression ratio of said working medium and the mass flow of said working medium.

- 5
- 10
- 15
- 20
- 25
- 30
- 35
- 40
- 45
- 50
- 55

- 10.** Thermal power plant comprising  
an expansion engine (2) operable within the framework of an Organic Rankine Cycle process for generating electrical energy, to which is supplied live steam (1) of an organic working medium in the wet steam region that is expanded to exhaust steam in said expansion engine; and  
an open-loop control or closed-loop control device;  
wherein  
said open-loop control or closed-loop control device is configured  
for determining at least one physical parameter of said exhaust steam;  
for determining at least one physical parameter of said live steam (1) based on said determined at least one physical parameter of said exhaust steam; and  
for open-loop controlling or closed-loop controlling and / or monitoring said thermal power plant based on said at least one determined physical parameter of said live steam (1); and  
wherein  
said open-loop control or closed-loop control device is configured for determining the isentropic degree of efficiency of said expansion engine (2) and said at least one physical parameter of said live steam (1) based on said determined degree of efficiency of said expansion engine (2).
- l'étape de détermination du rapport de pression du fluide de travail adjacent à la machine à expansion (2) et du débit massique du fluide de travail, et dans lequel se produit la détermination du rendement isentropique de la machine à expansion (2) sur base du rapport de pression adjacent déterminé du fluide de travail ainsi que du débit massique du fluide de travail.
- 10**           **3.** Procédé selon revendication 1, dans lequel la machine à expansion (2) est une machine volumétrique, en particulier une machine à expansion à piston, une machine à expansion à rotor ou une machine à expansion à vis, et comprenant en outre l'étape de détermination de la fréquence de rotation de la machine à expansion (2), et dans lequel la détermination du rendement isentropique de la machine à expansion (2) s'effectue sur base de la fréquence de rotation déterminée de la machine à expansion (2).
- 15**           **4.** Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, comprenant l'étape de modélisation du fonctionnement de la machine à expansion (2) avec le fluide de travail sur base d'équations thermodynamiques et de grandeurs de paramètre déterminées empiriquement, et dans lequel le rendement de la machine à expansion (2) est établi sur base du résultat de la modélisation du fonctionnement de la machine à expansion (2).
- 20**           **5.** Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel ledit au moins un paramètre physique déterminé de la vapeur d'échappement comprend la température et/ou la pression de la vapeur d'échappement.
- 25**           **6.** Procédé selon revendication 5, comprenant l'étape de détermination de la température de la vapeur vive (1) sur base de la température déterminée et de la pression déterminée de la vapeur d'échappement.
- 30**           **7.** Procédé selon l'une des revendications précédentes, comprenant en outre l'étape de détermination de la pression de la vapeur vive (1), qui diffère dudit au moins un paramètre physique de la vapeur vive (1) déterminé sur base dudit au moins un paramètre physique déterminé de la vapeur d'échappement, et dans lequel la détermination dudit au moins un paramètre physique de la vapeur vive (1) s'effectue sur base de la pression déterminée de la vapeur vive (1).
- 35**           **8.** Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel ledit au moins un paramètre physique déterminé de la vapeur vive (1) comprend l'enthalpie et/ou l'entropie et/ou le rapport volumétrique de la phase gazeuse à la phase liquide et/ou le titre de vapeur et/ou le rapport de densité de la phase gazeuse à la phase liquide de la vapeur vive.

## Revendications

- 1.** Procédé de commande ou régulation et/ou de surveillance d'un dispositif avec une machine à expansion (2), qui est utilisé dans un procédé à cycle organique de Rankine pour produire de l'énergie électrique, dans lequel la machine à expansion (2) reçoit de la vapeur vive (1) d'un fluide de travail organique dans la plage de vapeur humide, qui se détend dans la machine à expansion (2) pour former de la vapeur d'échappement, comprenant les étapes suivantes :
- détermination d'au moins un paramètre physique de la vapeur d'échappement ;  
détermination d'au moins un paramètre physique de la vapeur vive (1) sur base dudit au moins un paramètre physique déterminé de la vapeur d'échappement ; et  
commande ou régulation et/ou surveillance du dispositif sur base dudit au moins un paramètre physique déterminé de la vapeur vive (1) ; et  
détermination du rendement isentropique de la machine à expansion (2), dans lequel la détermination dudit au moins un paramètre physique de la vapeur vive (1) s'effectue sur base du rendement déterminé de la machine à expansion (2).
- 2.** Procédé selon revendication 1, comprenant en outre
- 40**
- 45**
- 50**
- 55**

9. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le dispositif est une centrale thermique à vapeur, en particulier une centrale thermique à vapeur à cycle organique de Rankine, ou encore un composant d'une telle centrale. 5
10. Centrale thermique comportant  
une machine à expansion (2) qui peut être utilisée pour la production d'énergie électrique dans un procédé à cycle organique de Rankine, qui reçoit de la vapeur vive (1) d'un fluide de travail organique dans la plage de vapeur humide, qui se détend dans la machine à expansion (2) pour former de la vapeur d'échappement ; et  
une commande ou une régulation ; 15  
dans laquelle  
la commande ou régulation est conçue pour déterminer au moins un paramètre physique de la vapeur d'échappement ;  
déterminer au moins un paramètre physique de la vapeur vive (1) sur base dudit au moins un paramètre physique déterminé de la vapeur d'échappement ; et commander ou réguler et/ou surveiller la centrale thermique sur base dudit au moins un paramètre physique déterminé de la vapeur vive (1) ; 20  
25  
dans laquelle  
la commande ou régulation est conçue pour déterminer le rendement isentropique de la machine à expansion (2) et pour déterminer ledit au moins un paramètre physique de la vapeur vive (1) sur base du rendement déterminé de la machine à expansion (2). 30

35

40

45

50

55

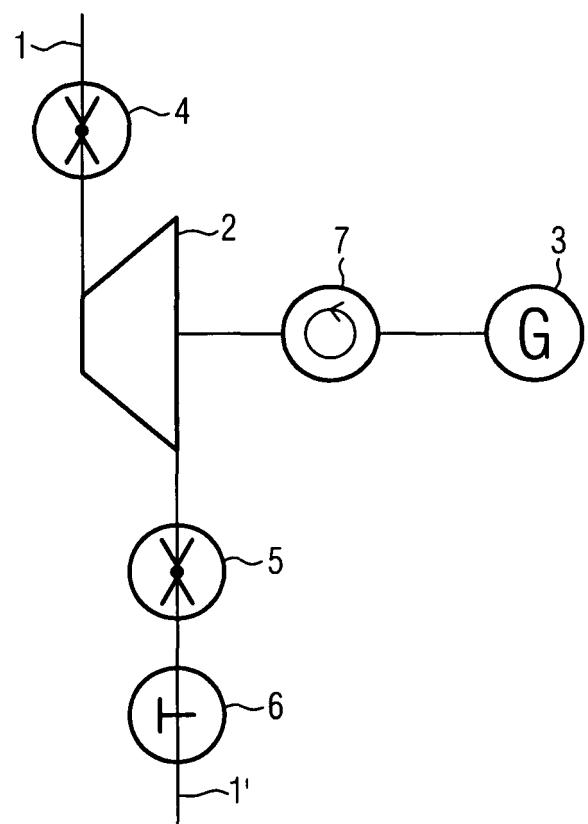


FIG. 1

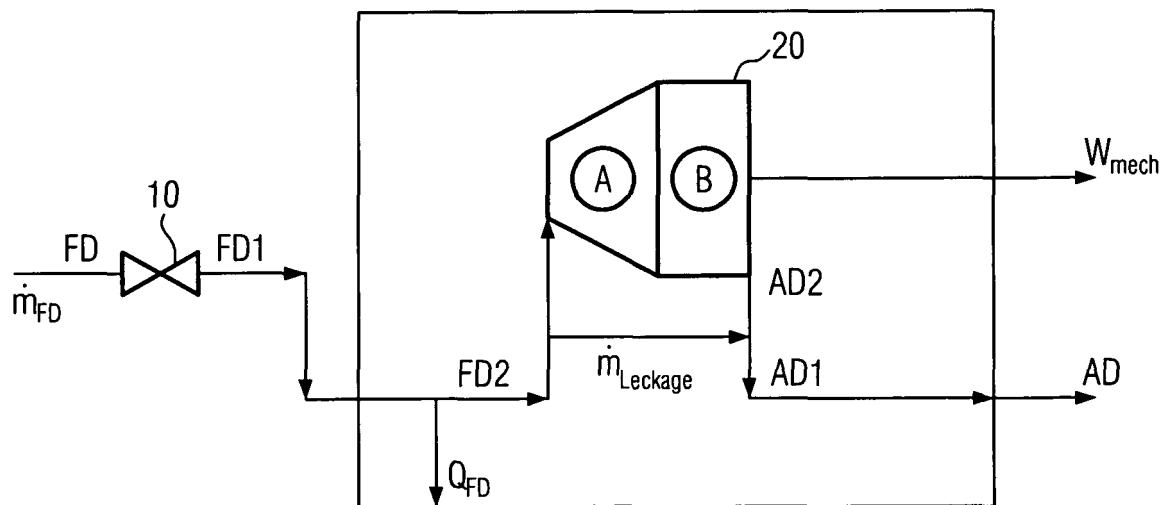


FIG. 2

**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**

- WO 0192689 A1 [0003]
- US 4827429 A [0004]
- WO 2007008225 A2 [0005]