



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
18.01.2017 Patentblatt 2017/03

(51) Int Cl.:
F01K 7/02 (2006.01) **F01K 7/04** (2006.01)
F01K 23/14 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **15177121.9**

(22) Anmeldetag: **16.07.2015**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
Benannte Validierungsstaaten:
MA

- **Langer, Roy**
81371 München (DE)
- **Kricke, Fabian**
81379 München (DE)
- **Schuster, Andreas**
86874 Tussenhausen (DE)

(71) Anmelder: **Orcan Energy AG**
81379 München (DE)

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

(72) Erfinder:
• **Aumann, Richard**
80796 München (DE)

(54) **REGELUNG VON ORC-PROZESSEN DURCH EINSPRITZUNG UNVERDAMPFTEN FLUIDS**

(57) Die Erfindung betrifft eine thermodynamische Kreisprozessvorrichtung, insbesondere eine ORC-Vorrichtung, umfassend einen Vorwärmer zum Vorwärmen eines Arbeitsmediums; einen Verdampfer zum Verdampfen und Überhitzen eines ersten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums; eine Expansionsmaschine zum Expandieren des verdampften und überhitzten ersten Massenstroms des Arbeitsmediums; einen Kondensator zum Kondensieren des aus der Expansi-

onsmaschine austretenden Arbeitsmediums; eine Speisepumpe zum Pumpen von kondensiertem Arbeitsmedium zum Vorwärmer; und eine erste Zuführeinrichtung zum Zuführen eines zweiten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums zum teilweise expandierten ersten Massenstrom des Arbeitsmediums in der Expansionsmaschine. Weiterhin betrifft die Erfindung ein entsprechendes Verfahren.

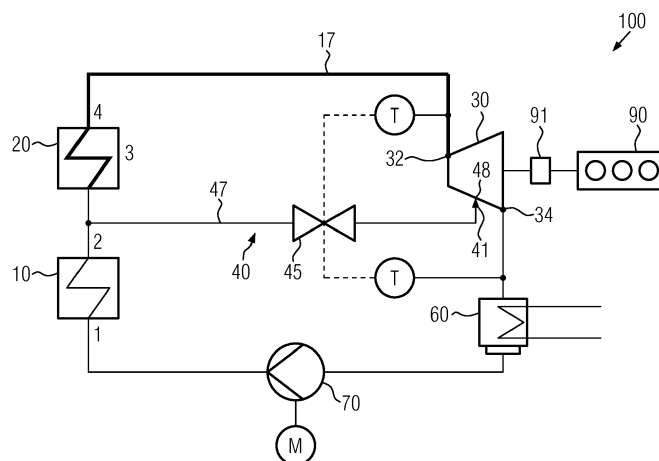


FIG. 1

Beschreibung

Gebiet der Erfindung

5 **[0001]** Die Erfindung betrifft eine thermodynamische Kreisprozessvorrichtung, die insbesondere eine ORC-Vorrichtung sein kann, und die einen Vorwärmer zum Vorwärmen eines Arbeitsmediums; einen Verdampfer zum Verdampfen und gegebenenfalls Überhitzen eines ersten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums; eine Expansionsmaschine zum Expandieren des verdampften und überhitzten Massenstroms des Arbeitsmediums; einen Kondensator zum Kondensieren und gegebenenfalls Unterkühlen des aus dem Auslass austretenden Arbeitsmediums; und eine Speisepumpe zum Pumpen von kondensiertem Arbeitsmedium zum Vorwärmer umfasst. Weiterhin betrifft die Erfindung ein
10 entsprechendes Verfahren zum Betreiben eines thermodynamischen Kreisprozesses, insbesondere eines ORC-Prozesses.

Stand der Technik

15 **[0002]** Wird ein krafterzeugender Prozess, wie z.B. der Organic Rankine Cycle (ORC), im Umfeld eines weiteren Aggregates, wie z.B. eines Verbrennungsmotors, betrieben, ist sowohl die direkte Einbindung der erzeugten Energie als mechanische Leistung in das Fremdsystem (z.B. kann die Expansionsmaschine des krafterzeugenden Prozesses den Fremdprozess zumindest unterstützend antreiben), als auch deren Bereitstellung für Nebenaggregate (z.B. kann
20 der Fremdprozess eine Pumpe im krafterzeugenden Prozess antreiben) oft vorteilhaft, da es bei der Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie zu Umwandlungsverlusten kommt. Zudem entfallen durch die eingesparten Motoren für Antrieb bzw. Generatoren für Abtrieb ebenfalls Kosten und die Kompaktheit kann gesteigert werden, was beides kritische Faktoren für die Integration eines krafterzeugenden Prozesses in das genannte Umfeld sind.

[0003] Durch eine direkte Anbindung (beispielsweise eine Kopplung über eine starre Welle) verliert jedoch einer der
25 Prozesse den Freiheitsgrad der Drehzahlsteuerung (meist der nachgelagerte Prozess). Um dies zu umgehen, kann eine Anbindung über ein Getriebe erfolgen. Hierdurch kann sowohl eine gestufte als auch eine stufenlose Anbindung die Drehzahlsteuerung ermöglichen. Dieser Wiedergewinn der Drehzahlsteuerung geht jedoch mit einer Reihe nachteiliger Eigenschaften einher. Zum einen stellt ein Getriebe einen zusätzlichen Kostenaufwand dar, der je nach Anwendung einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass Getriebe (insbesondere stufenlose) ebenfalls zu einer Wirkungsgradeinbuße führen. Getriebe unterliegen ferner einer erheblichen Beanspruchung und fügen der Anlage somit zusätzlichen Wartungsaufwand und entsprechende Kosten hinzu. Nicht
30 zuletzt ist ein Getriebe ebenfalls vergleichsweise bauraumintensiv, was dem Ziel der Kompaktheit bei vielen Anwendungen der Motorintegration entgegensteht.

[0004] Durch die hier beschriebene Kopplung der Expansionsmaschine oder der Kopplung sowohl der Expansionsmaschine als auch der Speisepumpe des ORC-Systems an Fremdprozesse ohne Getriebe gehen die Freiheitsgrade der Drehzahlregelung verloren. Hierdurch können keine für den ORC-Betrieb günstigen und für die Komponenten erforderlichen Parameter geregelt werden - vor allem Volumenströme, Temperaturen und Druckniveaus. Dies stellt insbesondere ein Problem für den Betrieb dar, da die erlaubten Temperaturen der Komponenten limitiert sind, insbesondere auf der Abströmseite der Expansionsmaschine.

[0005] Außerdem kann durch das Fehlen der Drehzahlregelung der Expansionsmaschine nicht gezielt ein Expansionsverhältnis zur Verfügung gestellt werden, welches zu dem in einer volumetrischen Expansionsmaschine fest verbautem Volumenverhältnis korreliert. Die im Stand der Technik übliche Umsetzung eines variablen Volumenverhältnisses mittels variablem Ein- bzw. Auslassfenster stellt ein aufwändiges und teures Verfahren dar, welches die Wirtschaftlichkeit von ORC-Systemen behindert. Eine für die Expansionsmaschine unpassende Expansion kann jedoch zum einen zu
40 stark fallenden Wirkungsgraden und somit ebenfalls einer Unwirtschaftlichkeit des Gesamtsystems führen oder im Extremfall eine Überschreitung des zulässigen Maximaldrucks zur Folge haben. Die Überschreitung von maximal zulässigen Drücken und Temperaturen führt zu einem Ausfall der Anlage mit möglichen Folgeschäden.

Beschreibung der Erfindung

50 **[0006]** Aufgabe der Erfindung ist es die genannten Nachteile zumindest teilweise zu überwinden, und dementsprechend die folgenden vier Aufgaben zumindest teilweise zu lösen:

1. Absenken der Überhitzung (bei gegebenem Druck) um die Komponenten vor einem Betrieb bei Temperaturen oberhalb ihrer Limitierung zu schützen und/oder Absenken der Überhitzung um eine Wirtschaftlichkeit des Systems durch verbesserte Wirkungsgrade zu gewährleisten. Die Überhitzung bei trockenen Fluiden ist per se schädlich für den Wirkungsgrad, da sie Energie auf hohem Temperaturniveau darstellt, welche keinen zusätzlichen Beitrag zur Expansion leistet. Je weiter der Abdampf im überhitzten Bereich liegt, desto mehr Wärme muss vor der Verflüssigung

im Kondensator abgeführt werden.

2. Vermeidung von für den Betrieb ineffektiven Volumenverhältnissen auf Grund der nicht regelbaren Drucklagen bei festem Volumenverhältnis der Expansionsmaschine.

3. Vermeidung von zu hohen Drücken (absolut oder auf die vom System erreichbare Verdampfungstemperatur bezogen), welche zu Schäden an der Anlage oder einer Nichtverdampfung des Fluides oder Teilen hiervon führen, was neben einem Wirkungsgradeinbruch ebenfalls Schäden verursachen kann.

4. Vermeidung von zu großen Massenströmen des Arbeitsmediums, welche durch die zur Verfügung stehende Wärme nicht (in ausreichendem Maße) verdampft werden können.

[0007] Die Aufgaben 1 und 2 werden gelöst durch eine Vorrichtung nach Anspruch 1 und ein Verfahren nach Anspruch 11.

[0008] Die erfindungsgemäße thermodynamische Kreisprozessvorrichtung, die insbesondere eine ORC-Vorrichtung sein kann, umfasst einen Vorwärmer zum Vorwärmen eines Arbeitsmediums; einen Verdampfer zum Verdampfen und Überhitzen eines ersten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums; eine Expansionsmaschine zum Expandieren des verdampften und überhitzten ersten Massenstroms des Arbeitsmediums; einen Kondensator zum Kondensieren des aus der Expansionsmaschine austretenden Arbeitsmediums; und eine Speisepumpe zum Pumpen von kondensiertem Arbeitsmedium zum Vorwärmer. Die erfindungsgemäße thermodynamische Kreisprozessvorrichtung ist gekennzeichnet durch eine erste Zuführeinrichtung zum Zuführen eines zweiten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums zum teilweise expandierten ersten Massenstrom des Arbeitsmediums in der Expansionsmaschine.

[0009] Dies ermöglicht die Freiheitsgrade der Absenkung der Abdampf Temperatur und eines angepassten Expansionsverhältnisses. Die Überhitzung kann auf diese Weise reduziert werden, und das Volumenverhältnis der Expansion kann dynamisch verringert werden.

[0010] Die erfindungsgemäße Vorrichtung kann dahingehend weitergebildet werden, dass die erste Zuführeinrichtung einen Zuführeinlass der Expansionsmaschine und eine erste Zuführleitung zwischen dem Vorwärmer und dem Zuführeinlass umfassen kann.

[0011] Der Zuführeinlass kann in Fluidverbindung mit einem Expansionsraum der Expansionsmaschine bei einem vorbestimmten Volumenbereich des Expansionsraums angeordnet sein, wobei der Expansionsraum zwischen einem Einlass und einem Auslass der Expansionsmaschine expandiert.

[0012] Eine andere Weiterbildung besteht darin, dass die erste Zuführeinrichtung ein erstes ansteuerbares Drossel-element, insbesondere ein erstes thermostatisches Expansionsventil, zum Regeln des zweiten Massenstroms umfasst und/oder wobei die erste Zuführeinrichtung eine Einspritzvorrichtung an der Expansionsmaschine, insbesondere am Zuführeinlass, umfassen kann.

[0013] Gemäß einer anderen Weiterbildung kann die thermodynamische Kreisprozessvorrichtung weiterhin eine zweite Zuführeinrichtung zum Zuführen eines dritten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums zum verdampften und überhitzten ersten Massenstrom des Arbeitsmediums vor dessen Expansion in der Expansionsmaschine umfassen. Dies ermöglicht eine Temperaturlimitierungen vor der Direkteinspritzung in die Expansionsmaschine und eine Absenkung der Überhitzung, auch wenn das reale Expansionsverhältnis nicht (weiter) abgesenkt werden soll. Diese Strategie erlaubt eine schnelle Regulierung der Frischdampf Temperatur.

[0014] Die zweite Zuführeinrichtung kann eine zweite Zuführleitung umfassen, die zwischen dem Vorwärmer oder der ersten Zuführleitung einerseits und dem Einlass oder einer zwischen dem Verdampfer und dem Einlass angeordneten dritten Leitung andererseits angeordnet ist.

[0015] Die zweite Zuführeinrichtung kann ein zweites ansteuerbares Drossel-element, insbesondere ein zweites thermostatisches Expansionsventil, zum Regeln des dritten Massenstroms umfassen.

[0016] Eine andere Weiterbildung besteht darin, dass die Speisepumpe mit einem über die Expansionsmaschine betriebenen Antriebsstrang gekoppelt sein kann; und wobei die Kreisprozessvorrichtung weiterhin eine regelbare Rezirkulationseinrichtung zum teilweisen Rezirkulieren von Arbeitsmedium von einer Hochdruckseite der Speisepumpe zu einer Niederdruckseite der Speisepumpe umfassen kann. Schwankungen und Instabilitäten in der Verdampfungszone können so vermieden werden.

[0017] Die regelbare Rezirkulationseinrichtung kann eine Leitung von der Hochdruckseite zu der Niederdruckseite der Speisepumpe umfassen, wobei die Leitung die mit einem dritten ansteuerbaren Drossel-element versehen sein kann.

[0018] Gemäß einer anderen Weiterbildung kann eine Drehung der Expansionsmaschine mit einer Drehung eines extern laufenden Prozesses koppelbar sein; wobei insbesondere eine Welle der Expansionsmaschine mit einem externen Antriebsstrang eines Motors koppelbar sein kann, entweder direkt oder indirekt über ein Getriebe.

[0019] Die erfindungsgemäße Aufgabe wird weiterhin gelöst durch ein Verfahren nach Anspruch 11.

[0020] Das erfindungsgemäße Verfahren zum Betreiben eines thermodynamischen Kreisprozesses, insbesondere

eines ORC-Prozesses, umfasst die folgenden Schritte: Vorwärmen eines Arbeitsmediums durch einen Vorwärmer; Verdampfen und Überhitzen eines ersten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums durch einen Verdampfer; Expandieren des verdampften und überhitzten ersten Massenstroms des Arbeitsmediums in einer Expansionsmaschine zwischen einem Einlass und einem Auslass der Expansionsmaschine; Kondensieren des aus dem Auslass austretenden Arbeitsmediums durch einen Kondensator; und Pumpen von kondensiertem Arbeitsmedium zum Vorwärmer mit einer Speisepumpe; wobei das Verfahren gekennzeichnet ist durch Zuführen eines zweiten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums zum teilweise expandierten ersten Massenstrom des Arbeitsmediums in der Expansionsmaschine.

[0021] Die Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens und dessen Weiterbildungen entsprechen - wenn nicht anders angegeben - jenen der erfindungsgemäßen Vorrichtung.

[0022] Gemäß einer Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens kann der folgende weitere Schritt vorgesehen sein: Regeln des zweiten Massenstroms und/oder Einspritzen des zweiten Massenstroms in einen Expansionsraum der Expansionsmaschine.

[0023] Eine andere Weiterbildung besteht darin, dass das Verfahren weiterhin umfassen kann: Zuführen eines dritten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums zum verdampften und überhitzten ersten Massenstrom des Arbeitsmediums vor dessen Expansion in der Expansionsmaschine.

[0024] Gemäß einer anderen Weiterbildung kann der dritte Massenstrom geregelt werden.

[0025] Eine andere Weiterbildung besteht darin, dass der folgende weitere Schritt vorgesehen sein kann: Koppeln einer Drehung der Expansionsmaschine mit einer Drehung eines extern laufenden Prozesses; insbesondere durch Koppeln einer Welle der Expansionsmaschine mit einem externen Antriebsstrang eines Motors, entweder direkt oder indirekt über ein Getriebe.

[0026] Die genannten Weiterbildungen können einzeln eingesetzt oder wie beansprucht geeignet miteinander kombiniert werden.

[0027] 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. Es versteht sich weiterhin, dass einige oder sämtliche der im Weiteren beschriebenen Merkmale auch auf andere Weise miteinander kombiniert werden können.

Zeichnungen

[0028]

Fig. 1 zeigt eine erste Ausführungsform der erfindungsgemäßen thermodynamischen Kreisprozessvorrichtung.

Fig. 2 zeigt eine zweite Ausführungsform der erfindungsgemäßen thermodynamischen Kreisprozessvorrichtung.

Fig. 3 zeigt eine dritte Ausführungsform der erfindungsgemäßen thermodynamischen Kreisprozessvorrichtung.

Fig. 4 zeigt qualitativ den Zusammenhang von Expansionsverhältnis und Expansionswirkungsgrad.

Fig. 5 ist eine beispielhafte Darstellung des Zusammenhangs von Druck und Enthalpie bei der Direkteinspritzung von vorgewärmtem Arbeitsmedium in die Expansionsmaschine.

Ausführungsformen

[0029] Fig. 1 zeigt eine erste Ausführungsform der erfindungsgemäßen thermodynamischen Kreisprozessvorrichtung 100 in Form einer ORC-Vorrichtung (Organic Rankine Cycle). Die Kreisprozessvorrichtung umfasst einen Vorwärmer 10 zum Vorwärmen eines Arbeitsmediums; einen Verdampfer 20 zum Verdampfen und Überhitzen eines ersten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums; eine Expansionsmaschine 30 zum Expandieren des verdampften und überhitzten ersten Massenstroms des Arbeitsmediums; einen Kondensator 60 zum Kondensieren des aus der Expansionsmaschine 30 austretenden Arbeitsmediums; und eine Speisepumpe 70 (mit ist Motor M) zum Pumpen von kondensiertem Arbeitsmedium zum Vorwärmer 10. Erfindungsgemäß ist eine erste Zuführeinrichtung 40 zum Zuführen eines zweiten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums zum teilweise expandierten ersten Massenstrom des Arbeitsmediums in der Expansionsmaschine 30 vorgesehen.

[0030] Die erste Zuführeinrichtung 40 umfasst einen Zuführeinlass 48 der Expansionsmaschine 30 und eine erste Zuführleitung 47 zwischen dem Vorwärmer 10 und dem Zuführeinlass 48. Der Zuführeinlass 48 ist in Fluidverbindung mit einem Expansionsraum der Expansionsmaschine 30 bei einem vorbestimmten Volumenbereich des Expansionsraums angeordnet, wobei der Expansionsraum zwischen einem Einlass 32 und einem Auslass 34 der Expansionsmaschine 30 expandiert.

[0031] Die erste Zuführeinrichtung 40 umfasst weiterhin ein erstes ansteuerbares Drosselement 45, insbesondere ein erstes thermostatisches Expansionsventil, zum Regeln des zweiten Massenstroms umfasst und/oder wobei die erste Zuführeinrichtung 40 eine Einspritzvorrichtung 41 an der Expansionsmaschine 30, insbesondere am Zuführeinlass 48.

[0032] Die Regelung kann auf der Grundlage der gemessenen und exemplarisch dargestellten Temperaturen T erfolgen. Insbesondere kann das Drosselement 45 entsprechend angesteuert werden.

[0033] Die Drehung der Expansionsmaschine 30 ist mit einer Drehung eines extern laufenden Prozesses koppelbar; wobei insbesondere eine Welle 31 der Expansionsmaschine 30 mit einem externen Antriebsstrang eines Motors 90 koppelbar ist, entweder direkt oder indirekt über ein Getriebe 91, welches einen Freilauf oder Schaltmöglichkeiten umfassen kann.

[0034] Das Einspritzen des vorgewärmten Arbeitsmediums in die bereits teilweise erfolgte Expansion hat die im Folgenden dargestellte Wirkung.

I. Vorsehen einer Direkteinspritzung vorgewärmten Fluides in die laufende Expansion gemäß Prozessführung in Fig. 1 zur Lösung von Aufgaben 1 und 2:

[0035] Während der für den ORC-Kreis üblichen Prozesse der Vorwärmung VW ($\dot{Q}_{VW}$), Verdampfung VD ($\dot{Q}_{VD}$) und Überhitzung ÜH ($\dot{Q}_{ÜH}$) wird ein Teil des Fluides ($\dot{m}_{AM,DE}$) vor der Verdampfung abgeführt. Der Gesamtenergieeintrag in das System, welcher direkt oder über einen Zwischenkreis erfolgen kann, lässt sich wie folgt bestimmen:

$$\dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_{VW} + \dot{Q}_{VD} + \dot{Q}_{ÜH}$$

$$\dot{Q}_{VW} = (h_2 - h_1) * \dot{m}_{AM,VW} = (T_2 - T_1) * \bar{c}_{p,1-2} * \dot{m}_{AM,VW}$$

$$\dot{Q}_{VD} = (h_3 - h_2) * \dot{m}_{AM,VD} = \Delta h_{evap} * \dot{m}_{AM,VD}$$

$$\dot{Q}_{ÜH} = (h_4 - h_3) * \dot{m}_{AM,ÜH} = (T_4 - T_3) * \bar{c}_{p,3-4} * \dot{m}_{AM,ÜH}$$

[0036] Hier bezeichnen h_1 , h_2 , h_3 und h_4 die Enthalpien an den jeweiligen in Fig. 1 angegebenen Positionen. Für die hier angewandte Betrachtung des Abzweigens von Arbeitsmedium (AM) nach der Vorwärmung wird keine weitere Aufteilung des Massenstromes betrachtet und die Verdampfung und Überhitzung lässt sich zusammenfassen zu Verdampfen mit Überhitzen ($\dot{Q}_{VÜ}$):

$$\dot{Q}_{VÜ} = \dot{Q}_{VD} + \dot{Q}_{ÜH} = (h_4 - h_2) * \dot{m}_{AM,VÜ}$$

mit

$$\dot{m}_{AM,VÜ} = \dot{m}_{AM,VD} = \dot{m}_{AM,ÜH}$$

ferner gilt:

$$\dot{m}_{AM,VW} - \dot{m}_{AM,VÜ} = \dot{m}_{AM,DE}$$

[0037] Um sich erneut die Freiheitsgrade von Temperatur und angepasstem Expansionsverhältnis zu ermöglichen, wird das abgezweigte flüssige Arbeitsmedium der Expansionsmaschine über eine geeignete Zuführung bereits nach einem gewissen Anteil der Expansion zugeführt und direkt eingespritzt (Prozessführung gemäß Fig. 1). Um bei der

Einspritzung ein möglichst schnelles Erreichen des thermischen Gleichgewichtes (Wärmeeintrag bis eine einheitliche Temperatur in der Expansionskammer vorliegt) zu erreichen, muss die Einspritzvorrichtung entsprechend ausgeführt werden und eine gute Verteilung mit hohen Fluidoberflächen gewährleisten (z.B. feine Zerstäubung). Für die Regelbarkeit der Parameter wird ein Drosselement, insbesondere ein ansteuerbares oder ein passives Drosselement (z.B. thermostatisches Expansionsventil) in die Zuführleitung eingesetzt.

[0038] Für die Einspritzung in den Expander muss an geeigneter Stelle im Gehäuse eine Einlassbohrung vorgenommen werden. Diese muss je nach Volumenverhältnis der Expansionsmaschine bestimmt werden. Begrenzend in Richtung Expansionsbeginn wirkt der noch hohe Druck der Kammer, wodurch der Eintrag von flüssigem Fluid behindert wird. Zudem kann auch die Überhitzung im Verlauf der Expansion zunehmen, sodass zu einem späteren Zeitpunkt der Expansion auch mehr flüssiges Fluid verdampft werden kann. Andererseits sollte bis zur Kammeröffnung ausreichend Zeit sein, um ein thermisches Gleichgewicht mit vollständiger Verdampfung zu erhalten. Weiterhin ist auch die Teilnahme an einem großen Expansionsanteil an der Gesamtexpansion positiv für die Leistungsgenerierung.

[0039] Hierdurch können verschiedene positive Effekte erzielt werden:

a. Volumenverhältnisanpassung

[0040] Das Volumenverhältnis der Expansion (Φ_{EX}) kann dynamisch verringert werden (siehe dazu auch Fig. 5), es gilt der folgende Zusammenhang mit den spezifischen Volumina zum Zeitpunkt der Kammerschließung im Eintritt in die Expansionsmaschine ($v_{K,ein}$) sowie im Moment der Kammeröffnung am Austritt der Expansionsmaschine ($v_{K,aus}$) mit dem festen Volumenverhältnis der Expansionsmaschine V_i :

$$\Phi_{EX} = \frac{v_{K,aus}}{v_{K,ein}}$$

$$v_{K,ein} = \frac{V_{K,ein}}{m_{AM,K,ein}}$$

$$v_{K,aus} = \frac{V_{K,aus}}{m_{AM,K,aus}}$$

$$V_i = \frac{V_{K,aus}}{V_{K,ein}} = \text{konstant}$$

mit den Kammervolumina am Ein- und Auslass $V_{K,ein/aus}$ sowie der Masse des in der Kammer eingeschlossenen Arbeitsmediums $m_{AM,K,ein/aus}$. Da im Standardfall ohne Kammereinspritzung die Masse des Arbeitsmediums in der Kammer konstant ist, ergibt sich $\Phi_{EX} = V_i$.

[0041] Das real anliegende Expansionsverhältnis (Φ_{real}) bestimmt sich aus den Frischdampfparametern sowie den Abdampfparametern und ist von Druck und Temperatur vor und nach der Expansionsmaschine bestimmt.

[0042] Im Falle von $\Phi_{real} < \Phi_{EX}$ befindet man sich im Bereich der Nachkompression. Bei dieser wird das Fluid während der Expansion in der Expansionsmaschine (Kammer geschlossen) auf ein niedrigeres Druckniveau gebracht, als tatsächlich nach der Expansionsmaschine vorliegt. Dies führt dazu, dass nach dem Öffnen der Kammer das Fluid verdichtet wird, was durch die hierbei von der Expansionsmaschine aufzubringende erhöhte Ausschiebearbeit sehr negative Auswirkungen auf den Wirkungsgrad hat. Im Bereich der Nachexpansion ($\Phi_{real} > \Phi_{EX}$) hat der erhöhte Austrittsdruck aus der Kammer eine positive Wirkung. Hierbei liegt das Druckniveau in der Expansionskammer am Ende der Expansion noch über dem nach der Expansionsmaschine. Hierdurch expandiert das Fluid beim Öffnen der Kammer noch weiter, die Nachexpansion generiert aufgrund der geringeren von der Expansionsmaschine aufzuwendenden Ausschiebearbeit zusätzlich Leistung.

[0043] Durch die Einspritzung von Fluid während der Expansion gilt: $m_{AM,K,aus} > m_{AM,K,ein}$, was gemäß oben gezeigtem Zusammenhang zu einer Verringerung von Φ_{EX} führt, sodass $\Phi_{EX} < V_i$:

$$\Phi_{EX} = \frac{v_{K,aus}}{v_{K,ein}} = \frac{V_{K,aus}}{m_{AM,K,aus}} * \frac{m_{AM,K,ein}}{V_{K,ein}} = \frac{V_{K,aus}}{V_{K,ein}} * \frac{m_{AM,K,ein}}{m_{AM,K,aus}} = V_i * \frac{m_{AM,K,ein}}{m_{AM,K,aus}} < V_i$$

[0044] Diese Verschiebung ist mit dem qualitativen Verlauf des isentropen Expansionswirkungsgrades in Fig. 4 dargestellt.

[0045] Des Weiteren wird hierdurch das Prinzip einer internen Rekuperation (wie in Fig. 5 dargestellt) in den Prozess integriert.

[0046] Diese führt auf zwei Weisen zu einer Verbesserung der Leistungsabgabe des Systems. Zum einen wird die bei der Expansion steigende Überhitzung des trockenen Fluides genutzt, um zusätzliches vorgewärmtes AM für die Expansion zu verdampfen und somit den Massenstrom des an der Expansion teilnehmenden AM zu erhöhen. Die Energie der Überhitzung des Abdampfes müsste andernfalls durch den Kondensator abgeführt werden. Zusätzlich hierzu ist die Niedertemperaturwärmequelle des Vorwärmers meist nicht vollständig ausgenutzt und kann durch die erhöhte Fluidmenge in der Vorwärmung besser ausgenutzt werden.

[0047] Die interne Rekuperation vermeidet hierbei zwei Probleme, die eine normale Rekuperation im Anschluss an die Expansion hat. Zum einen entsteht kein zusätzlicher Druckverlust durch Einbauten nach der Expansion, welche das für die Expansion verfügbare Druckniveau verringert. Weiterhin entspricht eine anschließende Rekuperation einer Vorwärmung des AM, wofür jedoch meist bereits ausreichend Wärme auf niedrigem Temperaturniveau zur Verfügung steht, weshalb dieser die genutzte Wärmemenge gegenüber der verfügbaren verringert.

b. Senkung der Überhitzung des Abdampfes

[0048] Neben dem positiven Effekt auf die Leistung, kann es ebenfalls durch die Limitierung der Komponenten, z.B. des dampfgekühlten Generators, notwendig sein, die Abdampftemperatur zu senken. Eine Erhöhung des Massenstromes würde die Überhitzung des AM verringern, kann jedoch keinen Einfluss auf das bereits als Frischdampf vorliegende Fluid nehmen und stellt somit einen relativ trägen Regeleingriff dar. Hingegen lässt sich dies durch die Einspritzung sehr schnell realisieren.

[0049] Da die Gesamtwärmebilanz durch die Bypassung nicht beeinflusst wird, ist auch durch diese schnelle Regelung der Frischdampftemperatur ein Nachregeln durch den Massenstrom notwendig. Dies geschieht durch die Drehzahlregelung der Pumpe (auf nicht drehzahlregelbare Pumpen wird in Abschnitt III. im Zusammenhang mit Fig. 3 eingegangen).

[0050] Temperaturlimitierungen von Komponenten, die sich vor der Direkteinspritzung in die laufende Expansion befinden, können hierdurch nicht gewährleistet werden (siehe hierzu Abschnitt II.)

c. Messung der Parameter

[0051] Hierfür sind zwei Regelstrategien denkbar:

1. Vor der Einspritzstelle: modellprädiktive Ermittlung der einzuspritzenden Menge an AM anhand eines gemessenen Ist-Wertes. Es wird nicht gemessen, inwiefern sich nach der Einspritzung der geforderte Sollwert (=Maximalwert) auch einstellt.

2. Nach der Einspritzstelle: "klassische" Regelung der einzuspritzenden Menge an AM durch Vergleich von Soll- und Istwert.

[0052] Fig. 2 zeigt eine zweite Ausführungsform der erfindungsgemäßen thermodynamischen Kreisprozessvorrichtung 200, die gegenüber der ersten Ausführungsform weitere Merkmale aufweist. Gleiche Bezugszeichen bedeuten dabei gleiche Elemente. Es ist eine zweite Zuführeinrichtung 50 zum Zuführen eines dritten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums zum verdampften und überhitzten ersten Massenstrom des Arbeitsmediums vor dessen Expansion in der Expansionsmaschine 30 vorgesehen. Die zweite Zuführeinrichtung 50 umfasst eine zweite Zuführleitung 57, die zwischen dem Vorwärmer 10 oder der ersten Zuführleitung 47 einerseits und dem Einlass 32 oder einer zwischen dem Verdampfer 20 und dem Einlass 32 angeordneten dritten Leitung 17 andererseits angeordnet ist, wobei die zweite Zuführeinrichtung 50 ein zweites ansteuerbares Drosselement 55, insbesondere ein zweites thermostatisches Expansionsventil, zum Regeln des dritten Massenstroms umfasst.

[0053] Diese Maßnahme hat die im Folgenden beschriebene Wirkung.

II. Vorsehen einer Direkteinspritzung vorgewärmten Fluides vor der Expansion gemäß Fig. 2 zur Lösung des verbleibenden Teiles von Problem 1 (Temperaturlimitierung vor der Expansion):

a. Senkung der Überhitzung des Frischdampfes

[0054] Zusätzlich zu der Direkteinspritzung in die Expansionsmaschine (Prozessführung gemäß Fig. 1) kann eine Direkteinspritzung von vorgewärmtem Fluid in den Frischdampf vor der Expansionsmaschine notwendig sein - beispielsweise

weise dann, wenn auch die Temperaturlimitierungen vor der Direkteinspritzung in die Expansionsmaschine nicht anderweitig sichergestellt sind (Prozessführung gemäß Fig. 2) oder wenn eine Absenkung der Überhitzung notwendig ist, jedoch das reale Expansionsverhältnis (durch Prozessführung gemäß Fig. 1) nicht (weiter) abgesenkt werden soll.

[0055] Diese Strategie erlaubt eine schnelle Regulierung auf die Frischdampf Temperatur, welche wie bereits beschrieben, durch die Pumpe zu langsam wäre.

[0056] Da die Gesamtwärmebilanz durch diese Maßnahme jedoch erhalten bleibt, muss ebenfalls die Regelung des Gesamtmassenstromes, beispielsweise durch Erhöhung der Pumpenleistung, erfolgen.

b. Messung der Parameter

[0057] Hierfür sind zwei Regelstrategien denkbar:

1. Vor der Einspritzstelle: modellprädiktive Ermittlung der einzuspritzenden Menge an AM anhand eines gemessenen Ist-Wertes. Es wird nicht gemessen, inwiefern sich nach der Einspritzung der geforderte Sollwert (=Maximalwert) auch einstellt.

2. Nach der Einspritzstelle: "klassische" Regelung der einzuspritzenden Menge an AM durch Vergleich von Soll- und Istwert.

[0058] Fig. 3 zeigt eine dritte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Kreisprozessvorrichtung 300. Die Speisepumpe 70 ist mit einem über die Expansionsmaschine 30 betriebenen Antriebsstrang gekoppelt, nämlich mit dem externen Motor 90; wobei die Kreisprozessvorrichtung weiterhin eine regelbare Rezirkulationseinrichtung 80 zum teilweisen Rezirkulieren von Arbeitsmedium von einer Hochdruckseite der Speisepumpe 70 zu einer Niederdruckseite der Speisepumpe 70 umfasst. Die regelbare Rezirkulationseinrichtung 80 umfasst eine Leitung 81 von der Hochdruckseite zu der Niederdruckseite der Speisepumpe 70, wobei die Leitung 81 die mit einem dritten ansteuerbaren Drosselement 82 versehen ist.

[0059] Diese Maßnahme hat die im Folgenden beschriebene Wirkung.

III. Vorsehen einer regelbaren Rezirkulation um die Speisepumpe im Falle einer zusätzlichen Kopplung der Speisepumpe an den Fremdprozess gemäß Fig. 3 zur Lösung der oben genannten Aufgaben 3 und 4:

[0060] Im Falle, dass die Pumpe ebenfalls fest mit dem Prozess gekoppelt wird, ist eine Auslegung der Pumpe mit Rezirkulationsschaltung notwendig (Prozessführung gemäß Fig. 3).

[0061] Der Nachteil dieser Verschaltung liegt darin, dass zusätzliche Verluste durch die Rezirkulation um die Pumpe erzeugt werden. Dies ist jedoch notwendig, um sich bei fester Anbindung die Regelung des Massenstromes zu erhalten.

[0062] Hierbei ist die Pumpe so zu dimensionieren, dass im Vollastfall möglichst geringe Verluste auftreten und gleichzeitig in Teillast ausreichend Regelleistung zur Verfügung steht. Regelleistung ist sowohl für die Erhöhung des Massenstromes durch den ORC-Kreis notwendig (z.B. bei zu hoher Überhitzung) als auch zur Senkung des Massenstromes (z.B. verfügbare Wärmemenge ist kleiner als durch AM abgeführte Wärmemenge oder der sich einstellende Frischdampfdruck liegt über dem Verdampfungsdruck bei dem verfügbaren Temperaturniveau).

[0063] Ferner besteht in der Aufteilung in eine Regelung mit zwei Komponenten, bei der die Erste den Verdampfer umgeht (Bypass zweigt vor VD ab und führt das Fluid nach VD+ÜH wieder zu), und die Zweite, die ein Nachregeln des Massenstroms (entweder durch Pumpe mit drehzahlregelbarem Motor oder über Rezirkulationsregelung) durch den Verdampfer umfasst, den Vorteil, dass plötzliche Schwankungen und Instabilitäten in der Verdampfungszone vermieden werden. Dieser Einfluss sei kurz am Beispiel einer zu starken Überhitzung mit der Notwendigkeit einer Erhöhung des Massenstromes dargelegt:

Die Regelung der Pumpe/Rezirkulation erhöht den Massenstrom, gleichzeitig wird die Direkteinspritzung vergrößert. Hierdurch erfährt die Durchströmung des Verdampfers und Überhitzers nur eine geringe Massenstromänderung. Da die verschiedenen Wärmeübergänge im Verdampfer/Überhitzer sensibel auf Füllstandsänderungen reagieren, hilft diese Maßnahme den Prozess zu stabilisieren. Im Falle, dass nur oder auch Prozessführung gemäß Fig. 2 zur Regelung eingesetzt wird, wird deren Anteil an $\dot{m}_{AM,DE}$ langsam wieder auf Null gefahren, sodass insgesamt ein schneller Regeleingriff mit rel. langsamen Änderungsraten in der Verdampferdurchströmung erreicht wird.

[0064] Die dargestellten Ausführungsformen sind lediglich beispielhaft und der vollständige Umfang der vorliegenden Erfindung wird durch die Ansprüche definiert.

Patentansprüche

1. Thermodynamische Kreisprozessvorrichtung (100, 200, 300), insbesondere eine ORC-Vorrichtung, umfassend:

5 einen Vorwärmer (10) zum Vorwärmen eines Arbeitsmediums;
einen Verdampfer (20) zum eventuellen weiteren Vorwärmen, Verdampfen und Überhitzen eines ersten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums; und
eine Expansionsmaschine (30) zum Expandieren des verdampften und überhitzten ersten Massenstroms des Arbeitsmediums;
10 einen Kondensator (60) zum Kondensieren des aus der Expansionsmaschine (30) austretenden Arbeitsmediums; und
eine Speisepumpe (70) zum Pumpen von kondensiertem Arbeitsmedium zum Vorwärmer (10);
gekennzeichnet durch
eine erste Zuführeinrichtung (40) zum Zuführen eines zweiten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums zum teilweise expandierten ersten Massenstrom des Arbeitsmediums in der Expansionsmaschine (30).

2. Thermodynamische Kreisprozessvorrichtung nach Anspruch 1, wobei die erste Zuführeinrichtung (40) einen Zuführeinlass (48) der Expansionsmaschine (30) und eine erste Zuführleitung (47) zwischen dem Vorwärmer (10) und dem Zuführeinlass (48) umfasst.

3. Thermodynamische Kreisprozessvorrichtung nach Anspruch 2, wobei der Zuführeinlass (48) in Fluidverbindung mit einem Expansionsraum der Expansionsmaschine (30) bei einem vorbestimmten Volumenbereich des Expansionsraums angeordnet ist, und wobei der Expansionsraum zwischen einem Einlass (32) und einem Auslass (34) der Expansionsmaschine (30) expandiert.

4. Thermodynamische Kreisprozessvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die erste Zuführeinrichtung (40) ein erstes Drosselement (45), insbesondere ein erstes thermostatisches Expansionsventil, zum Regeln des zweiten Massenstroms umfasst und/oder wobei die erste Zuführeinrichtung (40) eine Einspritzvorrichtung (41) an der Expansionsmaschine (30), insbesondere am Zuführeinlass (48), umfasst.

5. Thermodynamische Kreisprozessvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, weiterhin umfassend:

eine zweite Zuführeinrichtung (50) zum Zuführen eines dritten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums zum verdampften und überhitzten ersten Massenstrom des Arbeitsmediums vor dessen Expansion in der Expansionsmaschine (30).

6. Thermodynamische Kreisprozessvorrichtung nach Anspruch 5, wobei die zweite Zuführeinrichtung (50) eine zweite Zuführleitung (57) umfasst, die zwischen dem Vorwärmer (10) oder der ersten Zuführleitung (47) einerseits und dem Einlass (32) oder einer zwischen dem Verdampfer (20) und dem Einlass (32) angeordneten dritten Leitung (17) andererseits angeordnet ist.

7. Thermodynamische Kreisprozessvorrichtung nach Anspruch 5 oder 6, wobei die zweite Zuführeinrichtung (50) ein zweites Drosselement (55), insbesondere ein zweites thermostatisches Expansionsventil, zum Regeln des dritten Massenstroms umfasst.

8. Thermodynamische Kreisprozessvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei die Speisepumpe (70) mit einem über die Expansionsmaschine (30) betriebenen Antriebsstrang gekoppelt ist; und wobei die Kreisprozessvorrichtung weiterhin umfasst:

einer regelbare Rezirkulationseinrichtung (80) zum teilweisen Rezirkulieren von Arbeitsmedium von einer Hochdruckseite der Speisepumpe (70) zu einer Niederdruckseite der Speisepumpe (70).

9. Thermodynamische Kreisprozessvorrichtung nach Anspruch 8, wobei die regelbare Rezirkulationseinrichtung (80) eine Leitung (81) von der Hochdruckseite zu der Niederdruckseite der Speisepumpe (70) umfasst, und wobei die Leitung (81) mit einem dritten Drosselement (82) versehen ist.

10. Thermodynamische Kreisprozessvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei eine Drehung der Expansionsmaschine (30) mit einer Drehung eines extern laufenden Prozesses koppelbar ist; wobei insbesondere eine

Welle (31) der Expansionsmaschine (30) mit einem externen Antriebsstrang eines Motors koppelbar ist, entweder direkt oder indirekt über ein Getriebe, welches einen Freilauf oder Schaltmöglichkeiten aufweisen kann.

- 5 **11.** Verfahren zum Betreiben eines thermodynamischen Kreisprozesses, insbesondere eines ORC-Prozesses, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

10 Vorwärmen eines Arbeitsmediums durch einen Vorwärmer (10);
eventuelles weiteres Vorwärmen, Verdampfen und Überhitzen eines ersten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums durch einen Verdampfer (20);
15 Expandieren des verdampften und überhitzten ersten Massenstroms des Arbeitsmediums in einer Expansionsmaschine (30);
Kondensieren des aus dem Auslass (34) austretenden Arbeitsmediums durch einen Kondensator (60); und
Pumpen von kondensiertem Arbeitsmedium zum Vorwärmer (10) mit einer Speisepumpe (70);
gekennzeichnet durch
15 Zuführen eines zweiten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums zum teilweise expandierten ersten Massenstrom des Arbeitsmediums in der Expansionsmaschine (30).

- 12.** Verfahren nach Anspruch 11, mit dem weiteren Schritt:

20 Regeln des zweiten Massenstroms und/oder Einspritzen des zweiten Massenstroms in einen Expansionsraum der Expansionsmaschine (30) zwischen einem Einlass (32) und einem Auslass (34) der Expansionsmaschine (30).

- 25 **13.** Verfahren nach Anspruch 11 oder 12, weiterhin umfassend:

Zuführen eines dritten Massenstroms des vorgewärmten Arbeitsmediums zum verdampften und überhitzten ersten Massenstrom des Arbeitsmediums vor dessen Expansion in der Expansionsmaschine (30).

- 30 **14.** Verfahren nach Anspruch 13, mit dem weiteren Schritt:

Regeln des dritten Massenstroms.

- 15.** Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 14, umfassend:

35 Koppeln einer Drehung der Expansionsmaschine (30) mit einer Drehung eines extern laufenden Prozesses; insbesondere durch Koppeln einer Welle (31) der Expansionsmaschine (30) mit einem externen Antriebsstrang eines Motors, entweder direkt oder indirekt über ein Getriebe.

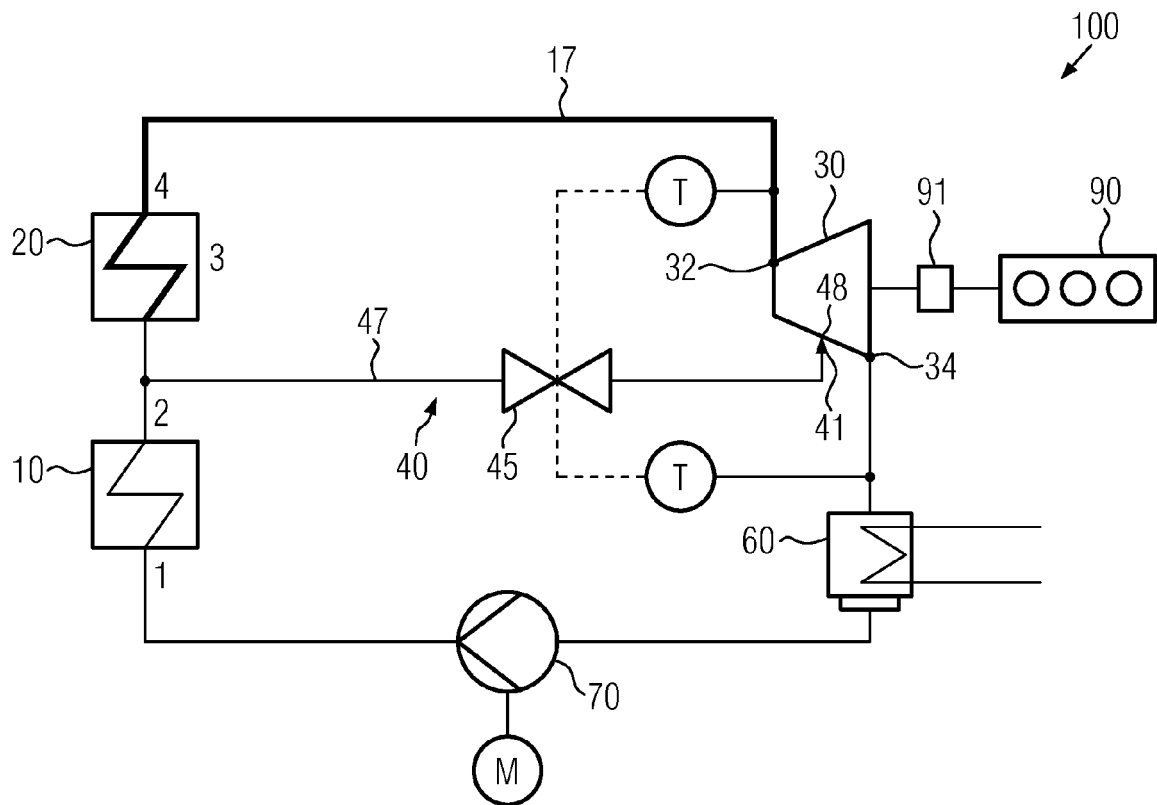


FIG. 1

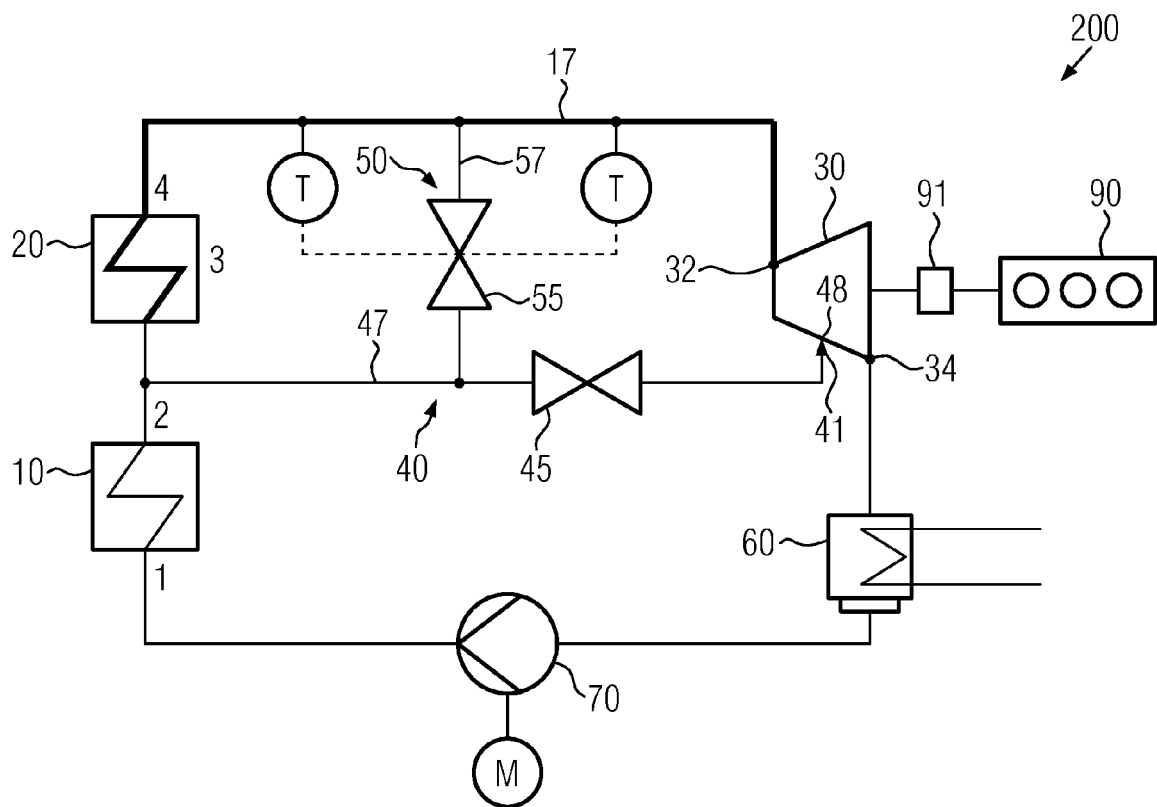


FIG. 2

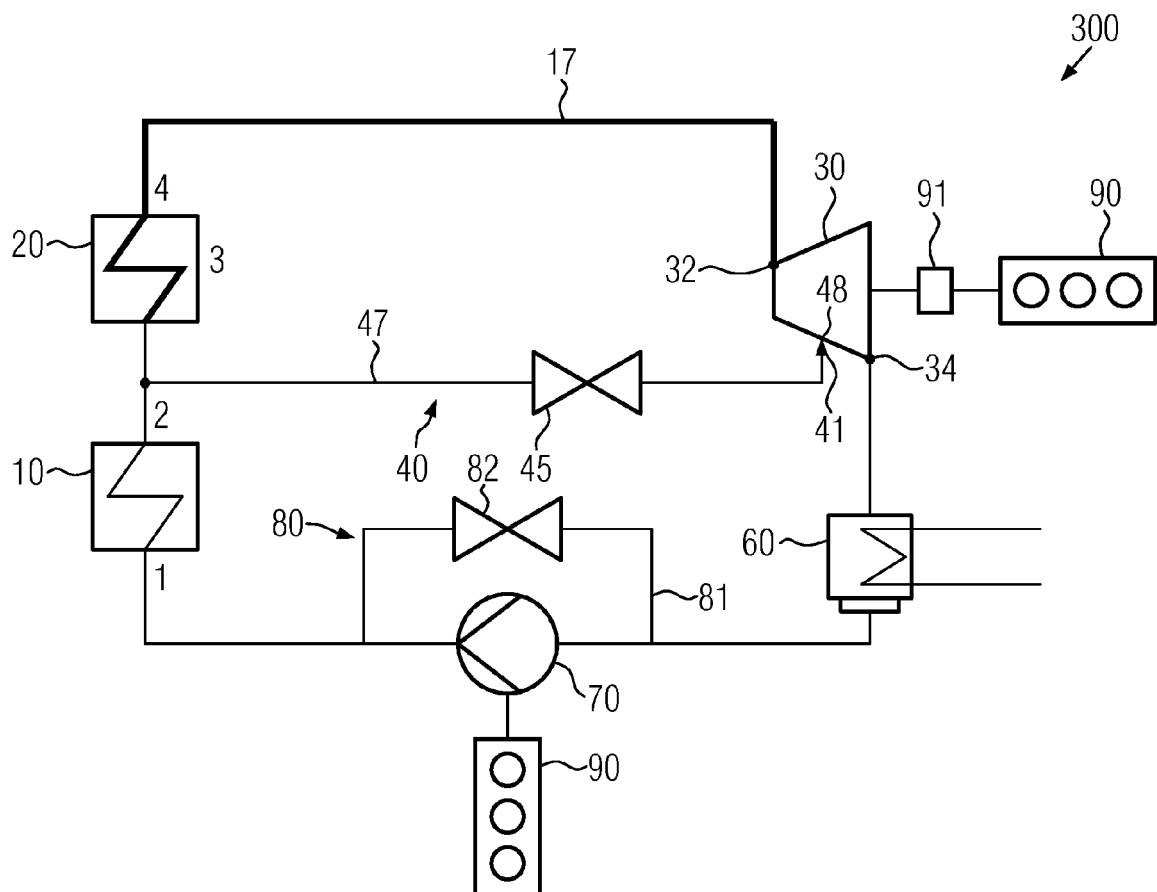


FIG. 3

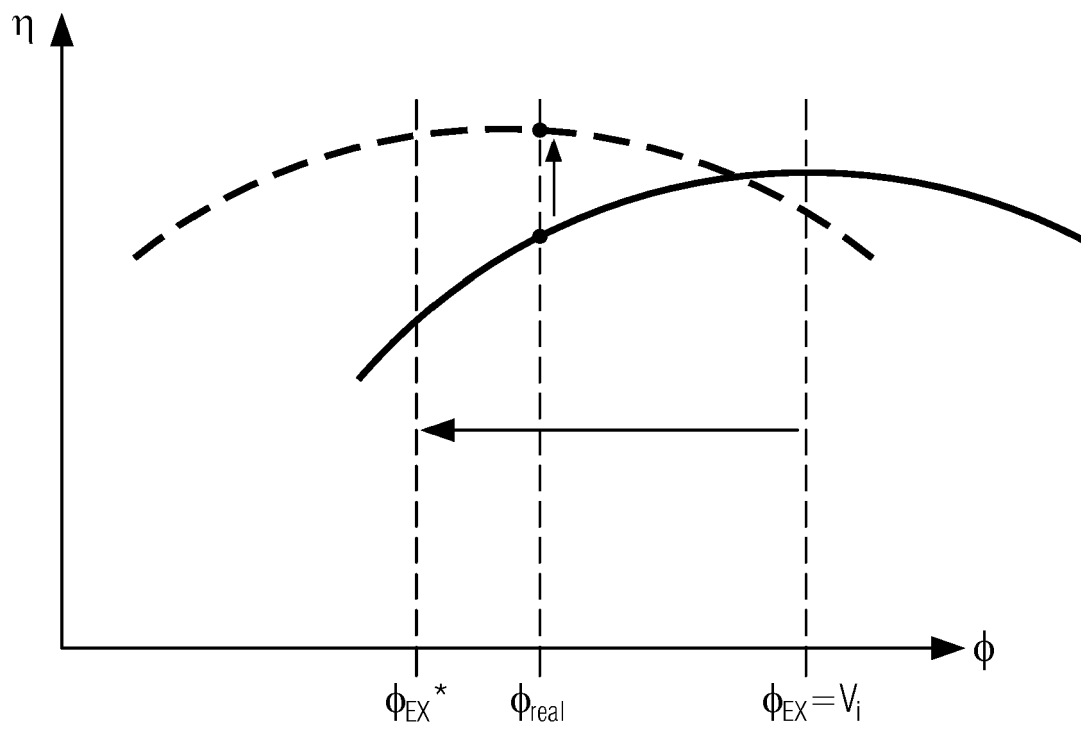


FIG. 4

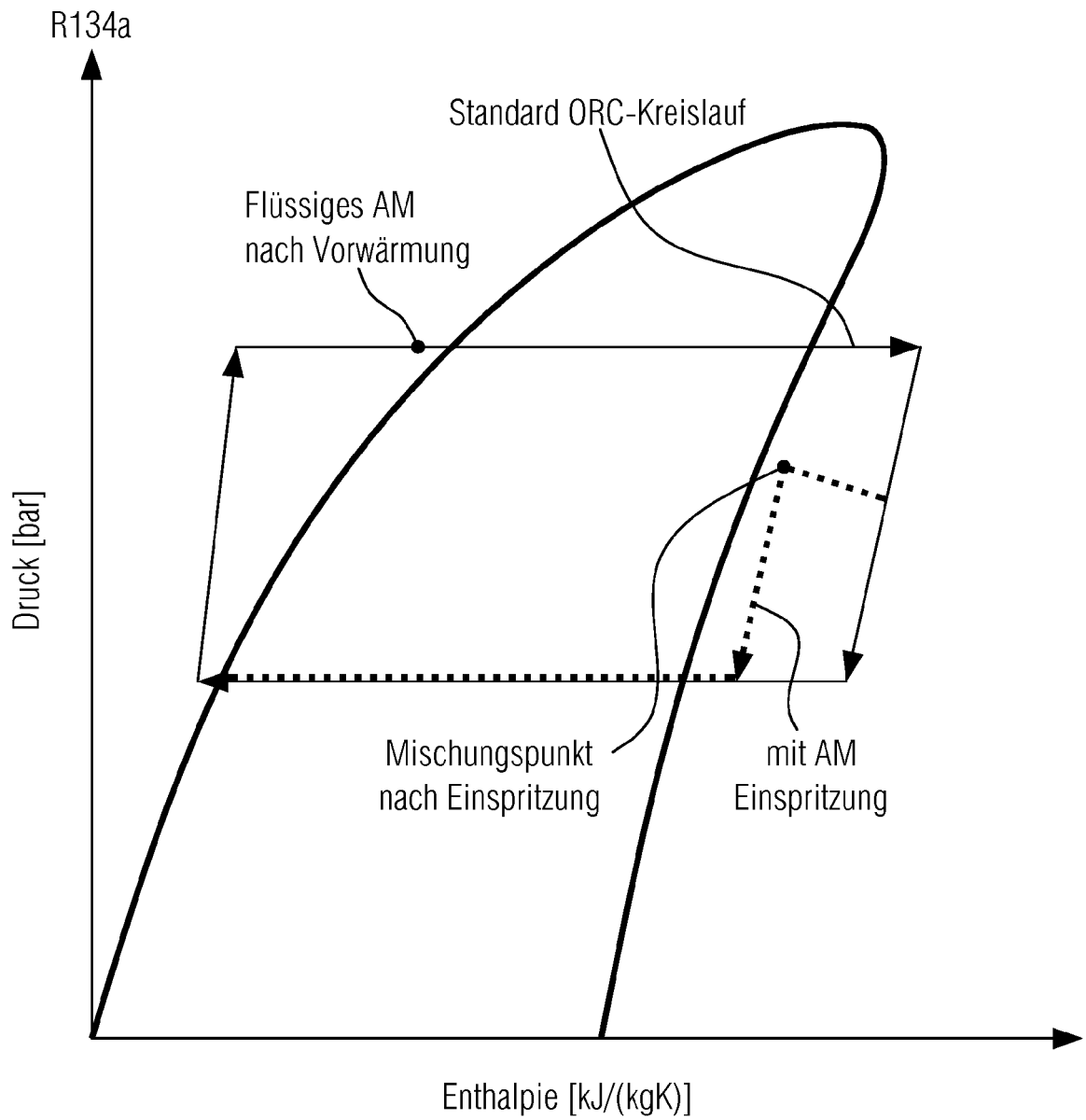


FIG. 5



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
EP 15 17 7121

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X A	US 6 035 643 A (ROSENBLATT JOEL H [US]) 14. März 2000 (2000-03-14) * Spalte 3, Zeile 65 - Spalte 7, Zeile 6; Abbildung 1 *	1-4, 10-12,15 8,9	INV. F01K7/02 F01K7/04 F01K23/14
X	US 5 555 731 A (ROSENBLATT JOEL H [US]) 17. September 1996 (1996-09-17) * Spalte 7, Zeile 10 - Spalte 8, Zeile 14; Abbildungen 1,2 *	1-4, 10-12,15	
X A	US 3 234 734 A (BUSS JOHN R ET AL) 15. Februar 1966 (1966-02-15) * Spalten 4,5; Abbildungen 3,4,6A,; Beispiele 3,4 *	1-7, 11-14 8,9	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			F01K
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 13. Januar 2016	Prüfer Röberg, Andreas
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

1

EPO FORM 1503 03.92 (P04C03)

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

EP 15 17 7121

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

13-01-2016

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 6035643 A	14-03-2000	AT 360744 T	15-05-2007
		AU 1445700 A	19-06-2000
		EP 1135579 A1	26-09-2001
		HK 1037017 A1	06-07-2007
		US 6035643 A	14-03-2000
		WO 0032909 A1	08-06-2000

US 5555731 A	17-09-1996	AT 237739 T	15-05-2003
		AU 5028496 A	18-09-1996
		DE 69627480 D1	22-05-2003
		DE 69627480 T2	12-02-2004
		EP 0812378 A1	17-12-1997
		US 5555731 A	17-09-1996
		WO 9627075 A1	06-09-1996

US 3234734 A	15-02-1966	KEINE	

EPO FORM P0461

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