

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



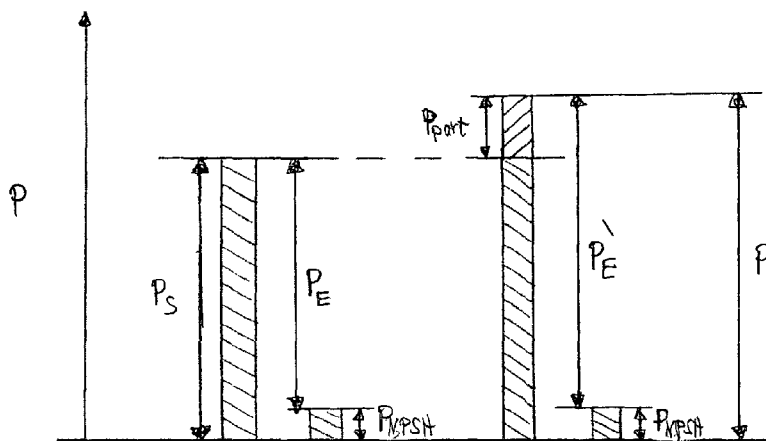
(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
19. Mai 2011 (19.05.2011)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2011/057724 A2**

- (51) **Internationale Patentklassifikation:** Nicht klassifiziert
- (21) **Internationales Aktenzeichen:** PCT/EP2010/006640
- (22) **Internationales Anmeldedatum:**  
30. Oktober 2010 (30.10.2010)
- (25) **Einreichungssprache:** Deutsch
- (26) **Veröffentlichungssprache:** Deutsch
- (30) **Angaben zur Priorität:**  
10 2009 053 390.7  
14. November 2009 (14.11.2009) DE
- (71) **Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US):** ORCAN ENERGY GMBH [DE/DE]; Boltzmannstraße 15, 85747 Garching (DE).
- (72) **Erfinder; und**
- (75) **Erfinder/Anmelder (nur für US):** SCHUSTER, Andreas [DE/DE]; Hintern Schlöble 3, 86874 Tussenhausen (DE). SICHERT, Andreas [DE/DE]; Schiffmeistergasse 1, 83410 Laufen (DE). AUMANN, Richard [DE/DE]; Seilerstraße 18, 88299 Leutkirch (DE).
- (74) **Anwalt:** TERGAU & POHL; Mögeldorf Hauptstraße 51, 90482 Nürnberg (DE).
- (81) **Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart):** AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) **Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart):** ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, GY, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- Veröffentlicht:**  
— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)

(54) **Title:** THERMODYNAMIC MACHINE AND METHOD FOR THE OPERATION THEREOF

(54) **Bezeichnung:** THERMODYNAMISCHE MASCHINE SOWIE VERFAHREN ZU DEREN BETRIEB



(57) **Abstract:** The invention relates to a thermodynamic machine (1), comprising a circulation system (2) in which a working fluid (10), in particular a low-boiling working fluid (10), circulates alternately in a gaseous and a liquid phase, a heat exchanger (3), an expansion machine (5), a condenser (6) and a fluid pump (8). The invention also relates to a method for operating said thermodynamic machine. According to the invention, in the flow line of the fluid pump (8) a partial pressure increasing the system pressure is applied to the liquid working fluid (10) by adding a non-condensing auxiliary gas (20). Compact ORC machines can be implemented, preventing cavitation in the liquid working fluid (10).

(57) **Zusammenfassung:** Es werden eine thermodynamische Maschine (1) mit einem Kreislauf-System (2), in dem ein insbesondere niedrig-siedendes Arbeitsfluid (10) abwechselnd in Gas- und Flüssigphase zirkuliert, mit einem Wärmeübertrager (3), mit einer Entspannungsmaschine (5),

mit einem Kondensator (6) und mit einer Flüssigkeitspumpe (8) sowie ein Verfahren zu deren Betrieb angegeben. Dabei

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

Fig. 2

WO 2011/057724 A2

---

ist vorgesehen, dass dem flüssigen Arbeitsfluid (10) im Vorlauf der Flüssigkeitspumpe (8) durch Zugabe eines nicht-kondensierenden Hilfsgases (20) ein den Systemdruck erhöhender Partialdruck aufgeprägt ist. Unter Vermeidung von Kavitation im flüssigen Arbeitsfluid (10) können kompakte, kleinbauende ORC-Maschinen realisiert werden.

## Beschreibung

### **Thermodynamische Maschine sowie Verfahren zu deren Betrieb**

Die Erfindung betrifft eine thermodynamische Maschine mit einem Kreislauf-System, in dem ein insbesondere niedrig siedendes Arbeitsfluid abwechselnd in Gas- und Flüssigphase zirkuliert. Dabei umfasst die Maschine einen Wärmeübertrager, eine Entspannungsmaschine, einen Kondensator und eine Flüssigkeitspumpe. Die Erfindung betrifft weiter ein Verfahren zum Betrieb einer derartigen thermodynamischen Maschine, wobei das Arbeitsfluid in einem Kreislauf erhitzt, entspannt, kondensiert und durch Pumpen des flüssigen Arbeitsfluids gefördert wird.

Unter einer solchen thermodynamischen Maschine wird insbesondere eine Maschine verstanden, die nach dem thermodynamischen Rankine-Kreisprozess arbeitet. Der Rankine-Kreisprozess ist hierbei durch ein Pumpen des flüssigen Arbeitsmediums, durch ein Verdampfen des Arbeitsmediums bei hohem Druck, durch ein Entspannen des gasförmigen Arbeitsfluids unter Verrichtung von mechanischer Arbeit sowie durch ein Kondensieren des gasförmigen Arbeitsfluids bei niedrigem Druck gekennzeichnet. Nach dem Rankine-Kreisprozess arbeiten beispielsweise heutige konventionelle Dampfkraftwerke. Typischerweise wird bei fossil beheizten Dampfkraftwerken bei einem Druck von über 200 bar Wasserdampf mit Temperaturen von über 500°C erzeugt. Die Kondensation des entspannten Wasserdampfes findet bei etwa 25°C und einem Druck von ca. 30 mbar statt.

Eine nach dem Rankine-Kreisprozess arbeitende thermodynamische Maschine sowie ein Verfahren zu deren Betrieb ist beispielsweise aus der WO 2005/021936 A2 bekannt. Als Arbeitsfluid dient hierbei Wasser.

Sollen Wärmequellen zur Verdampfung des Arbeitsfluids genutzt werden, die zur Wärmesenke nur einen relativ niedrigen Temperaturunterschied aufweisen, so genügt der mit dem Arbeitsfluid Wasser erreichbare Wirkungsgrad nicht mehr zu

einer wirtschaftlichen Arbeitsweise. Solche Wärmequellen können jedoch mit Hilfe von sogenannten ORC-Maschinen erschlossen werden, in denen statt dem Arbeitsfluid Wasser ein niedrig siedendes, insbesondere organisches Fluid eingesetzt ist. Unter dem Begriff „niedrig- siedend“ wird insofern verstanden, dass ein solches Fluid gegenüber Wasser bei niedrigeren Drücken siedet bzw. im Vergleich zu Wasser einen höheren Dampfdruck aufweist. Eine ORC-Maschine arbeitet entsprechend dem so genannten Organic-Rankine-Cycle(ORC)-Kreisprozess, d.h. im Wesentlichen mit einem von Wasser verschiedenen, insbesondere organischen, niedrig-siedenden Arbeitsfluid. Als Arbeitsfluide für eine ORC-Maschine sind beispielsweise Kohlenwasserstoffe, aromatische Kohlenwasserstoffe, fluorierte Kohlenwasserstoffe, Kohlenstoffverbindungen, insbesondere Alkane, Fluoräther, Fluorethan oder auch synthetisierte Silikonöle bekannt.

Mittels ORC-Maschinen bzw. -Anlagen können beispielsweise die in Geothermie- oder Solarkraftwerken zur Verfügung stehenden Wärmequellen wirtschaftlich zur Stromerzeugung genutzt werden. Auch kann mit einer ORC-Maschine bislang ungenutzte Abwärme eines Verbrennungsmotors aus Abluft, Kühlkreislauf, Abgas etc. zur Verrichtung von Arbeit oder zur Stromerzeugung genutzt werden.

Wenn der zu einer jeweiligen Temperatur gehörende Dampfdruck einer Flüssigkeit unterschritten wird, verdampft diese. Die Unterschreitung des Dampfdrucks kann in ruhenden oder in sich bewegenden Flüssigkeiten stattfinden. Beispielsweise kann bei einer strömenden Flüssigkeit aufgrund einer scharfen Umlenkung oder Beschleunigung der Strömung lokal der Dampfdruck unterschritten werden, so dass ein örtliches Verdampfen stattfindet. Die lokal entstehenden Dampfblasen kondensieren an Stellen höheren Druckes wieder und fallen in sich zusammen. Der Gesamtvorgang wird als Kavitation bezeichnet.

Bei einer thermodynamischen Maschine der eingangs genannten Art stellt eine in der flüssigen Phase des Arbeitsfluids auftretende Kavitation ein nicht unerhebliches Problem dar. Aufgrund der geringen Größe der Dampfblasen findet das Kondensieren dieser nämlich sehr schnell statt. Durch eine plötzliche Implosion der Dampfblasen bildet sich hierbei gegebenenfalls ein Mikrostrahl aus. Ist dieser

auf eine umgebende Wand gerichtet, so können lokal Druckspitzen bis zu 10.000 bar erreicht werden. Zusätzlich können durch die hohen Drücke lokale Temperaturen von weit über 1000 °C erreicht werden, was zu Schmelzvorgängen im Wandmaterial führen kann. Zerstörungseffekte durch Kavitationen können innerhalb von Stunden auftreten.

Bei einer Pumpe verringert das Auftreten von Kavitation zudem unerwünschterweise den Durchsatz an Fluid. Da sich die Dampfblasen in ihrer Dichte in aller Regel deutlich von der Flüssigkeit unterscheiden, reduziert sich selbst bei einem geringen Massenanteil des Arbeitsfluids als Dampf bei einem gegebenen Volumenstrom der förderbare Massenstrom. Bei einer starken Dampfentstehung bricht der Massenstrom gegebenenfalls sogar zusammen. Ist die Arbeitsmaschine beispielsweise als Pumpe in einer ORC-Anlage eingesetzt, so kann unter Umständen der gesamte Kreislauf-Prozess zum Erliegen kommen. Durch die mangelnde Pumpleistung kommt es zum Rückstau des flüssigen Arbeitsfluids im Kondensator, wodurch dessen Wirkung erheblich verringert ist. Hierdurch kommt die Wärmeabfuhr zum Erliegen. Dieser Zustand des Gesamtsystems kann nur schwer verlassen werden. Es muss abgewartet werden, bis das Arbeitsfluid durch Abkühlung selbst unterkühlt. Weiter bricht die Durchströmung im Verdampfer zusammen, so dass auch keine Wärme mehr abgeführt werden kann. Gegebenenfalls kann dann das verwendete Arbeitsfluid durch Überschreiten seiner Stabilitätsgrenze Schaden nehmen.

Für eine nach dem Rankine-Kreisprozess arbeitende Maschine ist das Problem des Auftretens von Kavitation beispielsweise in der EP 1 624 269 A2 beschrieben. Dort soll eine Kavitation in dem Arbeitsfluid Wasser innerhalb des Kondensators sowie der nachfolgenden Pumpe dadurch verhindert werden, dass am Kondensator eine spezifische Druck- und Temperaturregelung vorgesehen ist. Dafür sind entsprechende Druck- und Temperatursensoren umfasst. Insbesondere wird der Wasserpegel im Kondensator auf ein vorbestimmtes Niveau gehalten. Unterstützt wird dies durch ein Ablassventil, welches Wasser oder nicht-kondensierende Gase nach außen abführt.

Auch in der US 7,131,290 B2 ist für eine nach dem Rankine-Kreisprozess arbeitende Maschine die Bedeutung eines gleichbleibenden Wasserpegels im Kondensator beschrieben. Insbesondere ist die Auswirkung eines veränderlichen Wasserpegels auf die zur Wirkung kommenden Kühlflächen im Kondensator angegeben. Dringt aufgrund der im Kondensator herrschenden Unterdruckverhältnisse nicht-kondensierendes Gas wie Luft in das Kreislaufsystem des Arbeitsfluids ein, so sammelt sich dieses insbesondere im Kondensator. Um einen hieraus resultierenden Verlust der Kühlleistung zu verhindern, schlägt die US 7,131,290 B2 eine entsprechende Trenn- und Ablassvorrichtung vor.

Aus der DE 10 2006 013 190 A1 ist eine komplexe Fluidmaschine bekannt, die nach dem Clausius-Rankine-Kreisprozess arbeitet. Die Fluidmaschine hat eine Pumpe zum Unter-Druck-Setzen und Auspumpen eines Flüssigphasen-Arbeitsfluids und eine mit der Pumpe in Reihe verbundene Expansionsvorrichtung zum Erzeugen einer Antriebskraft durch Expansion des Arbeitsfluids, welches geheizt wird, um zu einem Gasphasen-Arbeitsfluid zu werden. Dabei ist vorgesehen, die Wärme des Arbeitsfluids an einer Auslassseite der Expansionsvorrichtung auf das Arbeitsfluid an einer Auslassseite der Fluidpumpe zu übertragen.

Aus der DE 36 41 122 A1 ist eine transportable Antriebseinheit zum Umsetzen von Wärme bekannt, die als eine thermodynamische Maschine der eingangs genannten Art ausgebildet ist und nach dem Rankine-Kreisprozess arbeitet.

Aus der DE 7 225 314 U ist eine Dampfkraftanlage bekannt, wobei ein organisches Arbeitsmittel im Rankine-Kreisprozess verwendet ist.

Auch aus der US 4,291,232 ist eine thermodynamische Maschine der eingangs genannten Art bekannt. Dabei zirkuliert als Arbeitsfluid eine Gas-/Flüssigkeits-Lösung, insbesondere eine Ammoniak/Wasser-Lösung. Durch die Lösung des Gases in der Flüssigkeit wird der Druck von Gas und Flüssigkeit abgesenkt. Durch Separieren des Gases unter Temperaturerhöhung wird der Druck erhöht.

Aufgabe der Erfindung ist es, eine thermodynamische Maschine der eingangs genannten Art dahingehend weiterzubilden, dass das Auftreten von Kavitation in der Flüssigkeit bzw. im flüssigen Arbeitsfluid möglichst vermieden ist. Weiter ist es eine Aufgabe der Erfindung, ein entsprechendes Verfahren zum Betrieb einer solchen thermodynamischen Maschine anzugeben, wobei Kavitation in der Flüssigkeit möglichst vermieden ist.

Bezüglich der Maschine wird die gestellte Aufgabe erfindungsgemäß durch die Merkmalskombination gemäß Anspruch 1 gelöst. Demnach ist für eine thermodynamische Maschine der eingangs genannten Art vorgesehen, dass dem flüssigen Arbeitsfluid im Vorlauf der Flüssigkeitspumpe durch Zugabe eines nicht-kondensierenden Hilfsgases ein den Systemdruck erhöhender Partialdruck aufgeprägt ist.

Die Erfindung geht dabei von der Erkenntnis aus, dass insbesondere bei der Konzeption einer ORC-Maschine die Möglichkeit eines Auftretens von Kavitation in der flüssigen Phase unterschätzt wird. So kommt es vor, dass bei der Gesamtkonzeption beispielsweise eine für eine Pumpe angegebene Vorlaufhöhe nicht eingehalten wird. Eine solche Vorlaufhöhe bewirkt durch die Fluidsäule am Ansaugstutzen dort eine notwendige Druckerhöhung. Aufgrund des vorgeschalteten Kondensators liegt nämlich das Fluid ohne Beachtung der Vorlaufhöhe an der Pumpe mit dem Sättigungs- oder Kondensationsdampfdruck an, sofern man davon ausgeht, dass keine Unterkühlung stattfindet. Bei Einschalten der Pumpe kann dann ohne Beachtung der Vorlaufhöhe durch die entstehende Saugleistung der Sättigungsdampfdruck unterschritten werden. Es kommt zur Kavitation.

Die Vorlaufhöhe für eine Pumpe ist typischerweise durch den so genannten NPSH-Wert gegeben. Unter dem NPSH-Wert (Net Positive Suction Head) wird hierbei die notwendige Mindestzulaufhöhe über dem Sättigungsdampfdruck verstanden. Mit anderen Worten drückt der notwendige NPSH-Wert die Saugleistung der Pumpe aus. Der NPSH-Wert wird in Meter angegeben. Er beträgt für eine hier geeignete Pumpe typischerweise einige Meter. Wird für eine gegebene Pumpe im Vorlauf demnach der NPSH-Wert nicht eingehalten, so kommt es während des

Betriebs zu nicht unerheblichen Kavitationsproblemen. Es kommt zu einer unerwünschten Bildung von Dampfblasen.

Nachteiligerweise muss insofern gerade bei der Konzeption einer kleinen und kompakten ORC-Maschine die Pumpe bezüglich des Anlagenniveaus abgesenkt angeordnet werden, was zu einer unerwünschten Bauraumvergrößerung führt.

Alternativen zur Vermeidung von Kavitation in der flüssigen Phase des Arbeitsfluids, wie beispielsweise eine Unterkühlung des Arbeitsfluids zur Absenkung des Dampfdrucks, sind wegen des zusätzlichen Aufwands teuer. Auch resultiert ein zusätzlicher Flächenbedarf. Zudem muss mehr Energie zur Aufheizung des unterkühlten Arbeitsfluids aufgebracht werden. In gleichem Maße ist der Einsatz einer Vorpumpe zum Erzeugen eines Zusatzdruckes am Saugstutzen nicht wirtschaftlich. Im Übrigen wird auch durch eine Zusatzpumpe zusätzlicher Bauraum benötigt.

In überraschender Weise erkennt die Erfindung nun, dass sich das Problem der Entstehung von Kavitationen in einer thermodynamischen Maschine durch den Einsatz eines nicht-kondensierenden Gases lösen lässt. Während bislang in nach dem Rankine-Kreisprozess arbeitenden Maschinen im Kreislauf befindliches nicht-kondensierendes Gas als unerwünscht, da den Wirkungsgrad absenkend, aufwändig entfernt wurde, sieht die Erfindung nun ein bewusstes Einbringen vor.

Die Erfindung erkennt nämlich, dass sich im Falle eines im Kreislauf befindlichen nicht-kondensierenden Gases dessen Partialdruck in der Gasphase zum Kondensationsdruck addiert. Der hieraus resultierende, in der gewünschten Art und Weise angehobene Systemdruck prägt sich dem flüssigen Arbeitsfluid insbesondere im Vorlauf der Flüssigkeitspumpe auf. Die mit der Zugabe eines nicht-kondensierenden Gases in den Kreislauf verbundenen Nachteile wie insbesondere eine Erhöhung des Gegendrucks für die Entspannungsmaschine wird im Falle eines niedrig-siedenden Arbeitsfluids durch die Vorteile einer Vermeidung von Kavitation aufgehoben. Im Falle eines niedrig-siedenden Arbeitsfluids wird gegenüber Wasser bei höheren Drücken kondensiert. Typischerweise kann bei Raumtemperatur

über Atmosphärendruck kondensiert werden. Der durch das Hilfsgas notwendig erzeugte Partialdruck wirkt sich insofern weniger und im Sinne des Gesamtkonzeptes vernachlässigbar auf den Gesamtwirkungsgrad aus.

Im Detail erlaubt es die Erfindung, die zugegebene Stoffmenge des Hilfsgases so zu wählen, dass die Vorlaufhöhe für die Pumpe im Sinne des zur Verfügung stehenden Bauraums entsprechend verringert werden kann. Zugleich kann hierbei beachtet werden, dass der für die Entspannungsmaschine hinderliche Gegen-  
druck in einem insgesamt akzeptablen Niveau verbleibt.

Die Erfindung bietet insofern den deutlichen Vorteil, dass eine kompakte thermodynamische Maschine zur Ausnutzung von Niedertemperatur-Wärmequellen konzeptioniert werden kann. Der Bauraum ist dabei durch die notwendige Vorlaufhöhe der Pumpe nicht mehr zwingend vorgegeben. Da grundsätzlich das nicht-kondensierende Hilfsgas beim Befüllen der Anlage einmalig mit eingebracht werden kann, sind gegebenenfalls sogar keinerlei baulichen Zusatzmaßnahmen erforderlich. Insofern bietet die Erfindung eine äußerst kostengünstige Möglichkeit zu einer weiteren Kompaktierung einer thermodynamischen Maschine. Die Erfindung eignet sich insofern hervorragend, um kleine mobile Maschinen zu konzeptionieren, die beispielsweise auf Kraftfahrzeugen zur Nutzung der Motoren-, Kühlmittel- oder Abgaswärme eingesetzt werden.

In einer vorteilhaften Ausgestaltung ist der durch die Zugabe des Hilfsgases resultierende Partialdruck ausreichend groß, damit im Vorlauf bei Betrieb der Flüssigkeitspumpe der Sättigungsdampfdruck nicht unterschritten ist. Wie im Folgenden dargelegt wird, ist dies unter gewissen Vereinfachungsannahmen (keine zusätzliche Unterkühlung der Flüssigkeit) beispielsweise dann der Fall, wenn der resultierende Partialdruck wenigstens dem NPSH-Wert der Flüssigkeitspumpe entspricht. Eine Vorlaufhöhe der Pumpe kann gegebenenfalls sogar ganz entfallen. Unter realen Bedingungen muss die Menge des zugeführten Hilfsgases so bemessen werden, dass der resultierende Partialdruck den Saugdruck bzw. den umgerechneten NPSH-Wert übersteigt.

Die Erfindung ist nicht zwingend auf eine thermodynamische Maschine eingeschränkt, die nach dem Rankine-Kreisprozess arbeitet. Beispielsweise kann auch eine Maschine umfasst sein, die keine Verdampfung des Arbeitsfluids vor der Entspannungsmaschine umfasst, sondern bei welcher in der Entspannungsmaschine durch einen sich kontinuierlich vergrößernden Arbeitsraum eine Flash-Verdampfung des Arbeitsfluids erfolgt. Insbesondere können kontinuierliche Phasenumwandlungen vorgenommen werden.

Im Sinne einer ORC-Maschine können als Arbeitsfluid auch Mischungen verschiedener Arbeitsmedien eingesetzt werden, um so eine an die gegebenen Bedingungen angepasste ideale Arbeitsweise der Maschine zu erzielen.

Unter Bezugnahme auf Fig. 2, linkes Teilbild, stellt sich in einer thermodynamischen Maschine des Standes der Technik im Kondensator entsprechend der gegebenen Temperatur der Sättigungsdampfdruck  $p_S$  des Arbeitsfluids ein. Wird die Pumpe zum Abzug der flüssigen Phase des Arbeitsfluids eingeschaltet, so wird am Ansaugstutzen ein Saugdruck gemäß dem gegebenen NPSH-Wert erzeugt. Um diesen Saugdruck  $p_{NPSH}$  verringert sich der Sättigungsdampfdruck  $p_S$ . Als Folge resultiert an der Pumpe ein Eingangsdruck  $p_E$ , der kleiner ist als der Sättigungsdampfdruck  $p_S$ . Folglich kommt es zur Bildung von Dampfblasen mithin zur Kavitation.

Durch ein zugegebenes nicht-kondensierendes Hilfsgas (rechtes Teilbild der Figur 2) resultiert an der Pumpe ein Systemdruck, der sich aus dem Sättigungsdampfdruck  $p_S$  und dem Partialdruck  $p_{part}$  des Hilfsgases addiert. Nach Einschalten der Pumpe wird dieser Systemdruck wiederum um den durch den NPSH-Wert vorgegebenen Saugdruck  $p_{NPSH}$  reduziert. Ist der aufgrund des eingebrachten Hilfsgases resultierende Partialdruck  $p_{part}$  dieses nicht-kondensierenden Gases größer als oder zumindest gleich dem Saugdruck  $p_{NPSH}$  am Ansaugstutzen der Pumpe, so ist der Eingangsdruck  $p_E$  nun aber zumindest gleich oder größer als der Sättigungsdampfdruck  $p_S$ . Eine Kavitation ist somit verhindert.

Für eine gewünschte, durch das Hilfsgas aufzubringende Druckdifferenz  $\Delta p$  zwischen dem Systemdruck und dem Sättigungsdampfdruck, vorteilhafterweise ist dies wenigstens  $p_{\text{NPSH}}$ , berechnet sich die notwendige Stoffmenge  $x_i$  des Hilfsgases nach

$$x_i = \frac{\Delta p}{\Delta p + p_s}$$

Für ein reales System wird dann die Stoffmenge  $x_i$  des Hilfsgases so bemessen, dass auch bei ungünstigen Bedingungen, also bei verringerten Kondensations-temperaturen und damit verringerten Sättigungsdampfdrücken, ausreichend Hilfsgas vorhanden ist. Auch ist zu berücksichtigen, dass ein Teil des Hilfsgases in Lösung geht und somit nicht mehr zur Erzeugung einer Druckdifferenz zur Verfügung steht. Auch können bei der Bemessung der zugeführten Stoffmenge des Hilfsgases unterschiedliche Betriebsphasen der Maschine (Teillast, Volllast) berücksichtigt werden.

In einer bevorzugten Ausgestaltung der Maschine kann gemäß den vorgenannten Ausführungen die Bauhöhe entsprechend dadurch verringert werden, dass die tatsächliche Vorlaufhöhe der Flüssigkeitspumpe gegenüber einer notwendigen Vorlaufhöhe, die den NPSH-Wert und gegebenenfalls eine Unterkühlung des flüssigen Arbeitsfluids berücksichtigt, verringert ist. Durch eine zusätzliche Unterkühlung der Flüssigkeit wird sich die notwendige Vorlaufhöhe aufgrund des herabgesetzten Dampfdrucks verringern. Die mögliche, weitere Verringerung der tatsächlichen Vorlaufhöhe ist durch den Partialdruck des eingebrachten Hilfsgases gegeben. Dabei kann zur Einhaltung gewisser Reserven auch eine geringe Vorlaufhöhe trotz entsprechender Einspeisung des Hilfsgases beibehalten werden. Eine Reduzierung der Vorlaufhöhe wird insofern durch eine entsprechende Stoffmenge des Hilfsgases kompensiert.

Die Einbringstelle für das Hilfsgas kann grundsätzlich an einer beliebigen Stelle des Kreislaufsystems der Maschine vorgesehen sein. Die Einbringstelle kann hierbei für ein einmaliges Einbringen oder für ein wiederholtes Einbringen des Hilfsgases ausgelegt sein. In einer bevorzugten Ausgestaltung ist eine Einbring-

stelle für das Hilfsgases zwischen der Entspannungsmaschine und der Flüssigkeitspumpe vorgesehen. Damit steht das Hilfsgas unmittelbar an der benötigten Stelle im Kreislauf zur Verfügung. Das Hilfsgas ist auf der kalten Seite des Kreisprozesses in die flüssige Phase eingebracht. Insbesondere kann das Hilfsgas dort auch leicht abgezogen werden, da es sich im Kondensator sammeln lässt. Dazu kann beispielsweise die Maschine „kaltgefahren“ werden, wodurch das Hilfsgas langsam in den Kondensator strömt. Zur Zugabe des Hilfsgases kann beispielsweise ein Kompressor verwendet werden. Alternativ kann eine Druckflasche angeschlossen sein. Eine Zugabe des Hilfsgases auf der heißen Seite des Kreisprozesses ist mit Mehraufwand verbunden.

Das nicht-kondensierende Hilfsgas ist ein solches Gas, welches unter den im Kreislauf der thermodynamischen Maschine herrschenden oder gegebenen Bedingungen nicht kondensiert. Als ein solches Hilfsgas eignen sich beispielsweise Edelgase oder Stickstoff. Auch kommen geeignete organische Gase in Frage.

Das nicht-kondensierende Hilfsgas wird sich in gewissem Umfang mit dem Arbeitsfluid im Kreislauf der thermodynamischen Maschine bewegen. Üblicherweise sind in nach dem Rankine-Kreisprozess arbeitenden Maschinen mit dem Arbeitsfluid Wasser für den Kondensator so genannte Rohrbündel-Wärmetauscher vorgesehen. Dabei werden die Rohre innen von einer Kühlflüssigkeit durchströmt.

Das gasförmige Arbeitsfluid strömt außen an den Rohren entlang, kondensiert auf deren Oberfläche und tropft als Kondensat oder flüssige Phase ab.

Nachteiligerweise reichert sich in einem solchen Kondensator abhängig von seiner Ausrichtung jedoch gegebenenfalls das nicht-kondensierenden Hilfsgas an. In diesem Fall verbleibt das Hilfsgas als eine isolierende Schicht um die Rohre, wodurch der Wirkungsgrad des Kondensators reduziert wird. Das nicht-kondensierende Hilfsgas kann nur abgebaut werden durch einen Abzug entgegen der Strömungsrichtung des Kondensats oder durch Diffusion.

Um bei Zugabe eines nicht-kondensierenden Hilfsgases diesen Nachteil zu vermeiden, ist der Kondensator vorteilhafterweise zu einer Mitnahme des Hilfsgases in Strömungsrichtung des Kondensats bzw. des flüssigen Arbeitsfluids ausgestaltet. Ein solcher Kondensator ist beispielsweise als ein Luftkondensator oder mittels Plattenwärmetauschelementen ausgebildet. Bei einem Luftkondensator strömt das gasförmige Arbeitsfluid durch das Innere von Rohren, die außen beispielsweise von Luft, aber auch von einem sonstigen Kühlmittel umströmt werden. In diesem Fall wird das Hilfsgas in Strömungsrichtung zumindest teilweise von nachfolgendem gasförmigen Arbeitsfluid durch die Rohre geschoben. Ebenfalls gilt dies für Kondensatoren, die mittels Plattenwärmetauschelementen gebildet sind. Auch hier strömt das gasförmige Arbeitsfluid durch die Zwischenräume der Plattenwärmetauschelemente und wird ein Teil des Hilfsgases mit aus dem Kondensator nehmen. Der für einen Rohrbündel-Wärmetauscher gegebene unerwünschte Effekt der Ausbildung einer Isolierschicht wird hierdurch verringert.

Weiter bevorzugt ist im Vorlagebehälter ein Sensor zur Erfassung der Hilfsgaskonzentration angeordnet. Mittels eines derartigen Sensors, der im Gasraum oberhalb der gesammelten Flüssigkeit des Arbeitsfluids angeordnet sein wird, kann beispielsweise die sich im Kreislaufsystem befindliche Stoffmenge des Hilfsgases gemessen und bei Unterschreiten oder Überschreiten eines vorgegebenen Grenzwertes ein Warnsignal ausgegeben werden. Entsprechend dem Warnsignal kann dann eine bestimmte Stoffmenge des Hilfsgases zugeführt oder abgezogen werden.

Wie vorbeschrieben eignet sich die angegebene thermodynamische Maschine insbesondere für eine mobile Anlage in einem Kraftfahrzeug, wobei der Wärmeübertrager wärmetechnisch an eine Abwärmequelle des Fahrzeugs gekoppelt ist. Eine solche Abwärmequelle stellt beispielsweise das Kühlmittel, ein sonstiges Betriebsmittel wie z.B. Öl, der Motorblock selbst oder das Abgas dar.

Die zur Stromerzeugung mit einem entsprechenden Generator gekoppelte Entspannungsmaschine ist bevorzugt als eine Verdrängermaschine ausgebildet. Eine derartige Verdrängermaschine ist beispielsweise eine Schrauben- oder Kolbenex-

pansionsmaschine oder eine Scrollexpansionsmaschine. Auch kann eine Flügelzellenmaschine eingesetzt sein.

Die auf ein Verfahren gerichtete Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die Merkmalskombination gemäß Anspruch 9 gelöst. Demnach ist für ein Verfahren zum Betrieb einer thermodynamischen Maschine vorgesehen, dass dem flüssigen Arbeitsfluid in einem Pumpenvorlauf durch Zugabe eines nicht-kondensierenden Hilfsgases ein den Systemdruck erhöhender Partialdruck aufgeprägt wird.

Weitere bevorzugte Ausgestaltungen können den auf ein Verfahren gerichteten Unteransprüchen entnommen werden. Dabei können die für die Maschine genannten Vorteile sinngemäß entsprechend übertragen werden.

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden anhand einer Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigen:

- Fig. 1            schematisch eine ORC-Maschine mit einem im Pumpenvorlauf aufgeprägten Partialdruck eines Hilfsgases und  
Fig. 2            eine schematische Darstellung verschiedener Druckverhältnisse.

In Fig. 1 ist schematisch eine ORC-Maschine 1 dargestellt, wie sie sich insbesondere als eine mobile Anlage zur Ausnutzung der Abwärme von Verbrennungskraftmaschinen eignet. Die ORC-Maschine 1 umfasst hierbei in einem Kreislaufsystem 2 als einen Wärmeübertrager 3 einen Verdampfer, eine Entspannungsmaschine 5, einen Kondensator 6 sowie eine Flüssigkeitspumpe 8. Die dargestellte ORC-Maschine 1 arbeitet nach dem Rankine-Kreisprozess, wobei an der Entspannungsmaschine 5 Arbeit zum Antrieb eines Generators 9 verrichtet wird. Der Generator 9 ist insbesondere zu einer Einspeisung des gewonnenen Stromes in das fahrzeugeigene Bordnetz ausgebildet bzw. hieran angeschlossen. Als Arbeitsfluid 10 ist ein Kohlenwasserstoff verwendet, der gegenüber Wasser einen deutlich höheren Dampfdruck aufweist. Das Arbeitsfluid 10 befindet sich in einem abgeschlossenen Kreislauf.

Das über die Flüssigkeitspumpe 8 geförderte flüssige Arbeitsfluid 10 wird in dem Verdampfer 3 bei einem hohen Druck verdampft. An der Entspannungsmaschine 5, die als eine Verdrängermaschine ausgebildet ist, entspannt sich das gasförmige Arbeitsfluid 10 unter Verrichtung der Arbeit. Das entspannte gasförmige Arbeitsfluid 10 wird in dem Kondensator 6 bei niedrigem Druck kondensiert. Der sich im Kondensator 6 einstellende Sättigungsdampfdruck beträgt etwa 1,2 bar. Das Kondensat bzw. das flüssige Arbeitsfluid 10 wird in einem Vorlagebehälter 11 gesammelt, bevor es durch die Pumpe 8 erneut zur Verdampfung gefördert wird.

Zur Kühlung des Kondensators 6 ist eine Abwärmeabfuhr 14 vorgesehen. Beispielsweise kann dies Umluft eines Kraftfahrzeugs sein, wobei die Kondensationswärme des Arbeitsfluids der Umluft beispielsweise zur Aufheizung des Fahrgastinnenraumes zugeführt wird. Der Kondensator 6 ist als ein Luftkondensator ausgebildet, in dem das zu kühlende Arbeitsfluid 10 im Inneren von umströmten Rohren entlang strömt.

Zur Verdampfung des von der Pumpe 8 geförderten Arbeitsfluids 10 wird dem Verdampfer 3 über eine Abwärmezufuhr 16 Wärme zugeführt. Dazu wird dem Verdampfer 3 über eine geeignete Wärmetauschung Wärme vom Abgas des Fahrzeugmotors zugeführt. Alternativ kann Wärme aus dem Kühlkreislauf des Verbrennungsmotors zugeführt werden. Auch kann die Abwärme des Verbrennungsmotors sowie des erzeugten Abgases insgesamt über ein entsprechendes Drittmedium dem Verdampfer 3 zugeführt werden.

Zwischen der Entspannungsmaschine 5 und der Flüssigkeitspumpe 8 ist am Kondensator 6 eine Einbringstelle 18 zur Einbringung eines nicht-kondensierenden Hilfsgases 20 in den Kreislauf der ORC-Maschine 1 vorgesehen. Über ein entsprechendes Ventil kann ein- oder mehrmalig eine spezifische Stoffmenge  $x_i$  des Hilfsgases 20 in den Kreislauf der ORC-Maschine eingebracht werden. Die Stoffmenge  $x_i$  ist hierbei so bemessen, dass sich im Vorlauf der Pumpe 8 der Partialdruck des Hilfsgases 20 und der Sättigungsdampfdruck des Arbeitsfluids 10 (resultierend aus der Kondensation im Kondensator 6) zu einem Systemdruck derart addiert, dass nach Einschalten der Pumpe der Sättigungsdampfdruck des

Arbeitsfluids nicht unterschritten wird. Es wird hierdurch auch ein Unterschreiten des Sättigungsdampfdruckes an Umlenkungen des strömenden Arbeitsfluids in flüssiger Phase verhindert. Insbesondere ist die Stoffmenge  $x_i$  derart bemessen, dass der resultierende Partialdruck des Hilfsgases größer ist als der dem NPSH-Wert der Pumpe entsprechende Saugdruck. Insofern wird im Vorlauf und insbesondere am Saugstutzen der Flüssigkeitspumpe 8 Kavitation verhindert. Da der Sättigungsdampfdruck des Arbeitsfluids 10 während des Betriebes nicht unterschritten wird, bilden sich dort keine Dampfblasen aus.

Die Vorlaufhöhe 21 (hier schematisch eingezeichnet) ist gegenüber dem NPSH-Wert der Flüssigkeitspumpe 8 deutlich auf nur wenige zehn Zentimeter abgesenkt. Im Vorlagebehälter 11 ist ein Sensor 22 zur Messung der Konzentration des Hilfsgases 20 angeordnet.

## Bezugszeichenliste

- 1 ORC-Maschine
- 2 Kreislaufsystem
- 3 Wärmeübertrager
- 5 Entspannungsmaschine
- 6 Kondensator
- 8 Flüssigkeitspumpe
- 9 Generator
- 10 Arbeitsfluid
- 11 Vorlagebehälter
- 14 Abwärmeabfuhr
- 16 Abwärmezufuhr
- 18 Einbringstelle
- 20 Hilfsgas
- 21 Vorlaufhöhe
- 22 Sensor

### Ansprüche

1. Thermodynamische Maschine (1) mit einem Kreislauf-System (2), in dem ein insbesondere niedrig siedendes Arbeitsfluid (10) abwechselnd in Gas- und Flüssigphase zirkuliert, mit einem Wärmeübertrager (3), mit einer Entspannungsmaschine (5), mit einem Kondensator (6) und mit einer Flüssigkeitspumpe (8),  
dadurch gekennzeichnet,  
dass dem flüssigen Arbeitsfluid (10) im Vorlauf der Flüssigkeitspumpe (8) durch Zugabe eines nicht-kondensierenden Hilfsgases (20) ein den Systemdruck erhöhender Partialdruck aufgeprägt ist.
2. Thermodynamische Maschine (1) nach Anspruch 1,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass der durch Zugabe des Hilfsgases (20) resultierende Partialdruck ausreichend groß ist, damit im Vorlauf bei Betrieb der Flüssigkeitspumpe (8) der Sättigungsdampfdruck nicht unterschritten ist.
3. Thermodynamischer Maschine (1) nach Anspruch 1 oder 2,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass die tatsächliche Vorlaufhöhe (21) der Flüssigkeitspumpe (8) gegenüber einer notwendigen Vorlaufhöhe, die den NPSH-Wert und gegebenenfalls eine Unterkühlung des flüssigen Arbeitsfluids (10) berücksichtigt, verringert ist.

4. Thermodynamische Maschine (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass eine Einbringstelle (18) für das Hilfgas (20) zwischen der Entspannungsmaschine (5) und der Flüssigkeitspumpe (8) vorgesehen ist.
5. Thermodynamische Maschine (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass der Kondensator (6) zu einer Mitnahme des Hilfgases (20) in Strömungsrichtung des Arbeitsfluids (10), insbesondere als ein Luftkondensator oder mittels Plattenwärmetauschelementen, ausgebildet ist.
6. Thermodynamische Maschine (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass die Entspannungsmaschine (5) eine Verdrängermaschine ist.
7. Thermodynamische Maschine (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass in einem Vorlagebehälter (11) des flüssigen Arbeitsfluids (10) ein Sensor (22) zur Erfassung der Hilfgaskonzentration angeordnet ist.
8. Verwendung einer thermodynamischen Maschine (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche als mobile Anlage für ein Kraftfahrzeug, wobei der Wärmeübertrager (3) wärmetechnisch mit einer Abwärmequelle (16) des Kraftfahrzeugs gekoppelt ist.
9. Verfahren zum Betrieb einer thermodynamischen Maschine (1), wobei in einem Kreislauf-System (2) ein insbesondere niedrig siedendes Arbeitsfluid (10) abwechselnd in Gas- und Flüssigphase zirkuliert, und wobei das Ar-

beitsfluid (10) erhitzt, entspannt, kondensiert und durch Pumpen der Flüssigkeit gefördert wird,

dadurch gekennzeichnet,

dass dem flüssigen Arbeitsfluid (10) in einem Pumpenvorlauf durch Zugabe eines nicht-kondensierenden Hilfsgases (20) ein den Systemdruck erhöhender Partialdruck aufgeprägt wird.

10. Verfahren nach Anspruch 9,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass das Hilfsgas (20) in einer solchen Menge eingebracht wird, dass der resultierende Partialdruck ausreichend groß ist, um während der Förderung des flüssigen Arbeitsfluids (10) im Pumpenvorlauf den Sättigungsdampfdruck nicht zu unterschreiten.
11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass das Hilfsgas (20) dem entspannten, gasförmigen Arbeitsfluid (10) zugegeben wird.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 11,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass das Hilfsgas (20) während des Kondensierens des Arbeitsfluids (10) überwiegend in Strömungsrichtung weitertransportiert wird.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 12,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass das Arbeitsfluid (10) in einer Verdrängermaschine entspannt wird.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 13,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass zum Erhitzen und/oder Verdampfen des Arbeitsfluids (10) Abwärme eines Kraftfahrzeugs herangezogen wird (16).

1/2

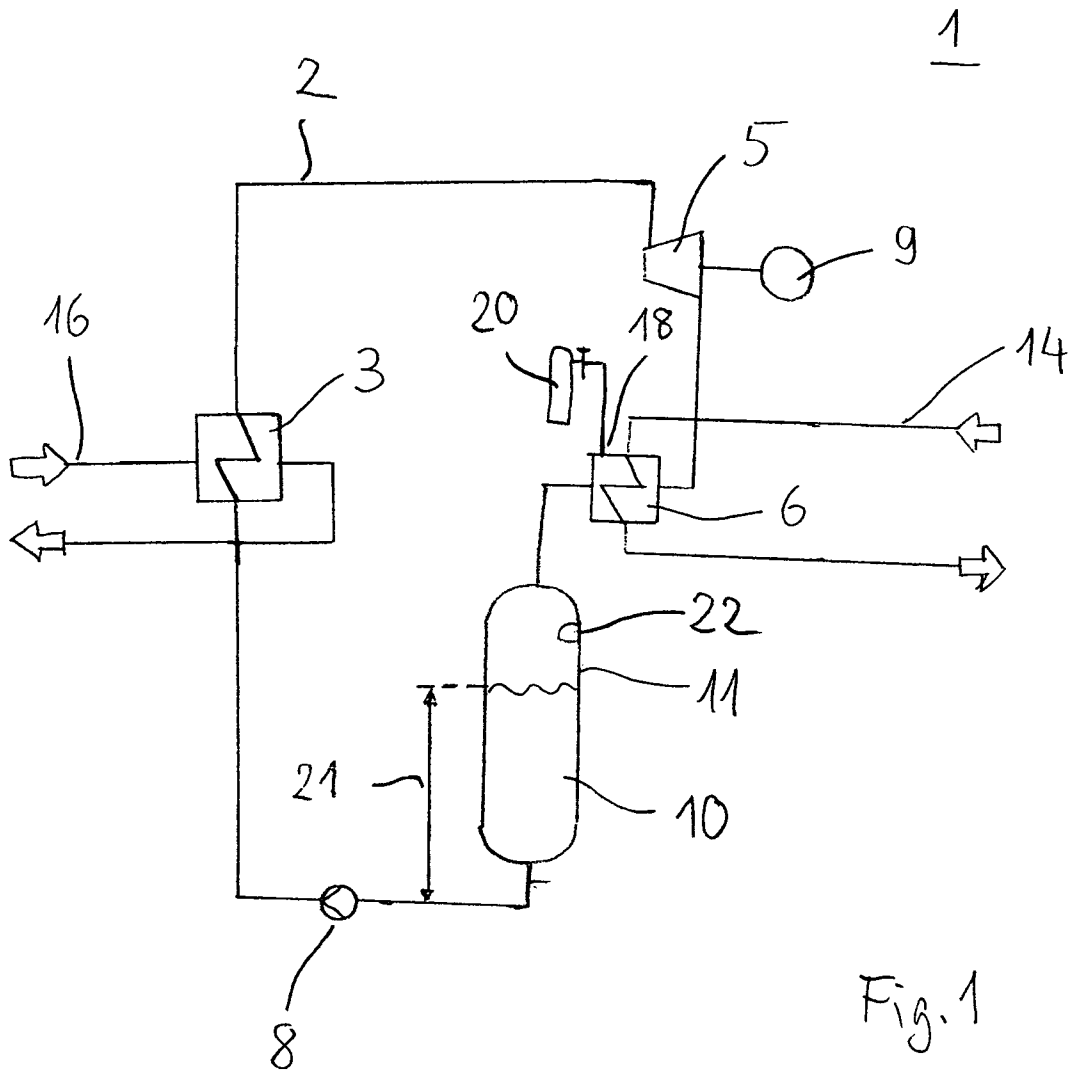


Fig. 1

2/2

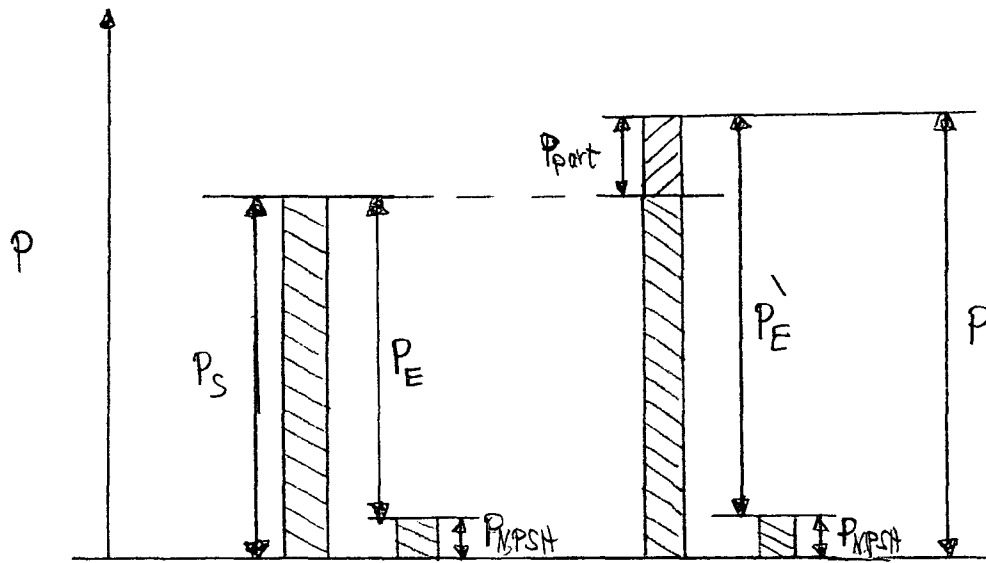


Fig. 2