

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50272/2022
(22) Anmeldetag: 25.04.2022
(43) Veröffentlicht am: 15.05.2023

(51) Int. Cl.: **F02C 1/10** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
AT 517636 A1

(71) Patentanmelder:
Messner Dieter
8522 Gross Sankt Florian (AT)

(72) Erfinder:
Messner Dieter
8522 Gross Sankt Florian (AT)

(74) Vertreter:
SONN Patentanwälte OG
1010 Wien (AT)

(54) **Verfahren und Vorrichtung zur Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Energie**

(57) Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung (1) zur Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Arbeit, aufweisend:

- einen Wärmetauscher (2) zum Erwärmen eines Prozessgases;
 - eine Expansionsmaschine (3) zur Expansion des Prozessgases unter Abgabe von mechanischer Arbeit;
 - eine Einspritzvorrichtung (4) zur Einspritzung eines Verdunstungsfluids zu dem Prozessgas zur Verdunstungskühlung des Prozessgases;
 - einen Verdichter (5) zur Verdichtung des Prozessgases;
 - einen Kondensationskühler (6) zur Abkühlung des Prozessgases und zur Kondensation und Abscheidung des Verdunstungsfluids aufweist,
- wobei die Vorrichtung (1) zur Führung des Prozessgases in einem geschlossenen Kreislauf eingerichtet ist. Weiters betrifft die Erfindung ein entsprechendes Verfahren.

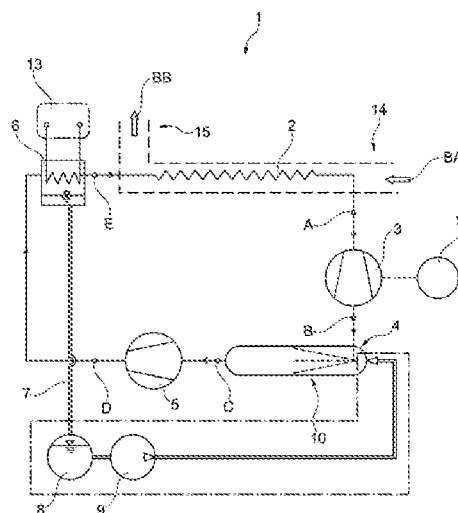


Fig. 1

Zusammenfassung:

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung (1) zur Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Arbeit, aufweisend:

- einen Wärmetauscher (2) zum Erwärmen eines Prozessgas;
- eine Expansionsmaschine (3) zur Expansion des Prozessgases unter Abgabe von mechanischer Arbeit;
- eine Einspritzvorrichtung (4) zur Einspritzung eines Verdunstungsfluids zu dem Prozessgas zur Verdunstungskühlung des Prozessgases;
- einen Verdichter (5) zur Verdichtung des Prozessgases;
- einen Kondensationskühler (6) zur Abkühlung des Prozessgases und zur Kondensation und Abscheidung des Verdunstungsfluids aufweist,

wobei die Vorrichtung (1) zur Führung des Prozessgases in einem geschlossenen Kreislauf eingerichtet ist. Weiters betrifft die Erfindung ein entsprechendes Verfahren

(Fig. 1)

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Energie, mit den Schritten:

- Erwärmen eines Prozessgas (insbesondere durch Zufuhr der thermischen Energie);
- Expandieren des (insbesondere erwärmten) Prozessgases unter Abgabe von mechanischer Arbeit;
- Einspritzen eines Verdunstungsfluids zu dem (insbesondere expandierten) Prozessgas zur Verdunstungskühlung des Prozessgases;
- Verdichten des (insbesondere verdunstungsgekühlten) Prozessgases.

Außerdem betrifft die Erfindung Vorrichtung zur Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Arbeit, aufweisend:

- einen Wärmetauscher zum Erwärmen eines Prozessgas;
- eine Expansionsmaschine zur Expansion des (insbesondere erwärmten) Prozessgases unter Abgabe von mechanischer Arbeit;
- eine Einspritzvorrichtung zur Einspritzung eines Verdunstungsfluids zu dem (insbesondere expandierten) Prozessgas zur Verdunstungskühlung des Prozessgases;
- einen Verdichter zur Verdichtung des (insbesondere verdunstungsgekühlten) Prozessgases.

Um die Energieeffizienz von thermischen Prozessen signifikant zu erhöhen, ist eine wirtschaftliche Rückverstromung der Abwärme, also der Wiedergewinnung von mechanischer bzw. elektrischer Energie aus Abluft bzw. Abgas, gewünscht.

Beispielsweise zeigt die US 2002/073712 A1 eine Wärmekraftmaschine, bei der ein Heißgasstrom in einer Turbine auf einen Druck unterhalb des Atmosphärendrucks entspannt wird. Der resultierende Gasstrom mit niedrigem Druck wird auf eine niedrigere Temperatur abgekühlt und dann durch einen Kompressor unter Druck gesetzt. Dabei kann die Kühlung durch Zugabe eines Wassernebels zum Gasstrom erfolgen. Der aus dem Kompressor austretende Druckluftstrom wird an die Atmosphäre abgegeben. Der Verdichter und die Turbine können sich eine gemeinsame Welle teilen und einen Generator antreiben, um elektrische Leistung zu erzeugen. Nachteiligerweise handelt es sich dabei um einen offenen Kreisprozess. Als Prozessgase können nur Luft oder Abgase verwendet werden. Die Wahl eines beliebigen Prozessgases ist nicht möglich;

so ist auch die Verwendung den Wirkungsgrad steigender, jedoch umweltschädlicher Prozessgase nicht möglich. Das Abgas ist regelmäßig verschmutzt und hat somit negative Auswirkungen auf die Vorrichtung. Des Weiteren lösen sich im Verdunstungsmedium Abgaskomponenten, sodass dieses verunreinigt wird und beispielsweise eine schwefelige Säure vorliegt. Außerdem liegt nach der Rückverdichtung nur Umgebungsdruck vor und es gibt keine Variabilität in Bezug auf eine Abstimmung des Prozessgases und des Siedeverhaltens des Verdunstungsfluids.

Bekannt ist auch der umgekehrte Brayton-Zyklus (inverse Brayton Cycle, iBC). Eine Wärmekraftmaschine mit umgekehrtem Brayton-Zyklus ist beispielsweise in US 2018/371954 A1 beschrieben. Der Prozess ist für die direkte Nutzung von Abgas aus einem Verbrennungsmotor vorgesehen und nicht mit einer Kolbenmaschine oder Verdrängermaschine realisierbar. Auch hierbei ist ein offener Kreisprozess vorgesehen. Ein Kühlungs-Wärmetauscher ist als Temperatursenke vorgesehen und somit durch das Kühlmedium limitiert; es erfolgt keine Verdunstungskühlung. Die Kondensation von Wasser erfolgt vor der Rückverdichtung für den Dampfkreislauf, d.h. es erfolgt keine Nassverdichtung. Es erfolgt auch keine Wasserrückgewinnung. Der Prozess weist insgesamt Wirkungsgradnachteile auf.

Die EP 1643575 A1 zeigt ein Brennstoffzellen-Atmosphärendruckturbinen-Hybridsystem. Dieses ist insbesondere für die direkte Nutzung von Abgas aus einer SOFC-Brennstoffzelle vorgesehen. Es ist wieder ein offener Kreislauf vorgesehen und eine Realisierung mit einer Kolbenmaschine oder einer Verdrängermaschine nicht möglich. Nachteiligerweise ist keine Wasserrückgewinnung durch Kondensation vorgesehen und das Prozessgas sowie der Ausgangszustand durch das Abgas vorgegeben.

Es ist eine Aufgabe der Erfindung, einen oder mehrere der Nachteile des Stands der Technik zu lindern oder zu beheben. Insbesondere ist es eine Aufgabe der Erfindung ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Energie bereitzustellen, das einen hohen Wirkungsgrad aufweist.

Dies wird gelöst durch ein Verfahren wie eingangs angeführt, wobei das Prozessgas in einem geschlossenen Kreislauf (d.h. Kreisprozess) geführt wird und das Verfahren weiter den Schritt aufweist: - Kondensationskühlen des Prozessgases, wobei das (insbesondere verdichtete) Prozessgas gekühlt wird und das Verdunstungsfluid zumindest teilweise kondensiert und abgeschieden wird. Außerdem wird dies gelöst durch eine Vorrichtung wie eingangs angeführt, wobei die Vorrichtung zur Führung des Prozessgases in einem geschlossenen Kreislauf eingerichtet ist und die Vorrichtung einen Kondensationskühler zur Abkühlung des (insbesondere vom Verdichter verdichteten) Prozessgases und zur Kondensation und Abscheidung des (insbesondere zur Verdunstungskühlung des Prozessgases eingespritzten) Verdunstungsfluids aufweist. Nach dem Kondensationskühlen des Prozessgases wird dieses insbesondere wieder (vom Wärmetauscher) erwärmt und der (Kreis-)Prozess somit von vorne begonnen.

Durch die Verwendung eines geschlossenen Kreislaufs wird verhindert, dass das Verdunstungsfluid mit einem verunreinigtem (Ab-)Gas in Kontakt kommt. Damit wird ein Lösen von Abgaskomponenten im Verdunstungsfluid verhindert und es ist in der Folge keine Aufbereitung des Verdunstungsfluids erforderlich. Außerdem wird ein Austragen des Verdunstungsfluids über das Prozessgas verhindert, da das Prozessgas in einem geschlossenen Kreislauf geführt wird. Somit bestehen für das Prozessgas und für das Verdunstungsfluid keine Einschränkungen bezüglich des zu verwendenden Mediums. Es sind beliebige Prozessgas-Verdunstungsfluid-Kombinationen möglich und diese können an die jeweiligen Anforderungen ideal angepasst werden, wobei insbesondere das Siedeverhalten des Verdunstungsfluids mit dem Prozessgas abgestimmt werden kann. Beispielsweise kann das Prozessgas ein Edelgas aufweisen. Somit sind hohe Wirkungsgrade erreichbar. Außerdem ermöglicht die gegenständliche Erfindung aufgrund der geschlossenen Prozessführung die Abwärmenutzung vom Druckniveau oder Phasenzustand der Quelle. Somit können Motoren mit stöchiometrischer Verbrennung gut ergänzt werden. Diese weisen zwar für sich genommen unter Umständen geringere Wirkungsgrade auf, erlauben jedoch durch ihre hohe Abgastemperatur effektive und einfache Abgasnachbehandlung und schaffen zugleich durch die möglichen hohen Prozessgastemperaturen gute Randbedingungen für die Nach-

schaltung der gegenständlichen Erfindung zur Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads. Es ergibt sich eine saubere und effiziente Gesamtanlage. Es ergibt sich auch eine geringere Komplexität als ein nachgeschalteter Dampfzyklus. Die Nassverdichtung führt zu einer Reduktion der Verdichtungsarbeit trotz erhöhtem Volumenstrom infolge des Dampfs des verdunstetem Fluids. Des Weiteren wird eine Rückverdichtung auf Umgebungsdruck, aber auch tiefer oder höher ermöglicht. Die Erfindung ist auch mit einer Kolbenmaschine oder einer Verdrängermaschine realisierbar.

Zusammenfassend ergibt sich ein besserer Wirkungsgrad bei einem einfacheren Aufbau, insbesondere im Vergleich zum inversen Brayton-Prozess. Die Verdunstungskühlung bei Unterdruck nach der Expansion erlaubt eine Abkühlung zum Teil bis unter Umgebungsbedingungen, was gewöhnlich unter den mit Wärmetauschern erreichbaren Temperaturen liegt. Insbesondere sorgt jedoch die nasse Rückverdichtung durch Verdunstungskühlung für eine sehr effiziente Rückverdichtung. Bei Darstellung im Temperatur-Entropie-Diagramm wird ein, im Sinne des Carnot-Prozesses effektiver, der Isothermen bestmöglich angenäherter Verlauf ab Expansionsende realisiert. Der Vorteil im thermodynamischen Wirkungsgrad beruht insbesondere auf konsequent niedriger Temperatur bei Kühlung sowie Nassverdichtung entlang der Sättigungskurve für das Verdunstungsfluid (z.B. Wasserdampf).

Das Verfahren weist somit insbesondere die folgenden Schritte auf:

- Erwärmung des Prozessgases,
- Expansion des Prozessgases unter Abgabe von Arbeit,
- Kühlung durch Verdunstung, d.h. Temperatursenke ohne Energieabfuhr (vorzugsweise erfolgt die Kühlung isobar, insbesondere bei Verwendung einer Kolbenmaschine ist auch eine isochore Kühlung möglich),
- Rückverdichtung mit Verdunstungskühlung (Nassverdichtung),
- Wärmeabgabe durch Kondensation von Verdunstungsfluid.

Die Verfahrensschritte können in beliebiger Reihenfolge ausgeführt werden, werden jedoch vorzugsweise in der angeführten Reihenfolge ausgeführt. Vorzugsweise ist eine Verbindungsleitung vorgesehen zwischen dem Wärmetauscher und der Expansionsmaschine, und/oder zwischen der Expansionsmaschine und der Einspritz-

vorrichtung, und/oder zwischen der Einspritzvorrichtung und dem Verdichter, und/oder zwischen dem Verdichter und dem Kondensationskühler, und/oder zwischen dem Kondensationskühler und dem Wärmetauscher. Vorzugsweise ist ein Leitungssystem vorgesehen, das das Prozessgas durch die Elemente in der folgenden Reihenfolge führt, wobei zwischen diesen Elementen weitere Elemente vorgesehen sein können: A) Wärmetauscher, B) Expansionsmaschine, C) Einspritzvorrichtung, D) Verdichter, E) Kondensationskühler, und wieder A) Wärmetauscher.

Insbesondere erfolgt die Kondensationskühlung nach der Verdichtung derart, dass nach der Expansion höchstens Sättigung des Prozessgases vorliegt und keine zusätzliche Kondensation beim eigentlichen Kondensationskühlen (bzw. in einer Verdunstungsstrecke) stattfindet. Typischerweise könnte beim Kondensationskühlen eine Abkühlung um zwischen 10 K und 40 K erfolgen und/oder beim Verdunsten nach Expansion eine Abkühlung um zwischen 10 K und 500 K erfolgen.

Vorzugsweise ist die Vorrichtung eingerichtet, das Verfahren gemäß einer der hierin angeführten Ausführungen durchzuführen. Vorzugsweise weist die Vorrichtung eine Kontrolleinheit zur Durchführung des Verfahrens gemäß einer der hierin angeführten Ausführungen auf.

Das Erwärmen des Prozessgases kann ein- oder mehrstufig (bzw. an einer oder mehreren Stellen) erfolgen. Der Wärmetauscher kann ein- oder mehrstufig ausgeführt sein. Das Expandieren des Prozessgases kann ein- oder mehrstufig (bzw. an einer oder mehreren Stellen) erfolgen. Die Expansionsmaschine kann ein- oder mehrstufig ausgeführt sein. Dies ist insbesondere für sehr hohe Druckverhältnisse vorteilhaft. Das Verdichten des Prozessgases kann ein- oder mehrstufig (bzw. an einer oder mehreren Stellen) erfolgen. Der Verdichter kann ein- oder mehrstufig ausgeführt sein. Das Kondensationskühlen kann ein- oder mehrstufig (bzw. an einer oder mehreren Stellen) erfolgen. Der Kondensationskühler kann ein- oder mehrstufig ausgeführt sein. Das Einspritzen des Verdunstungsfluids kann an einer oder mehreren Stellen erfolgen. Die Einspritzvorrichtung kann zum Einspritzen des Verdunstungsfluids an einer oder mehreren Stellen eingerichtet sein. Vor-

zugsweise erfolgt das Einspritzen des Verdunstungsfluids und das Verdichten in mehreren einander abwechselnden Stufen und/oder in einer oder mehreren gemeinsamen Stufen.

Das Prozessgas weist vorzugsweise ein Edelgas, beispielsweise Helium oder Argon, auf, insbesondere besteht es aus diesen. Der hohe Isentropenkoeffizient von Edelgasen bewirkt einen hohen thermodynamischen Wirkungsgrad. Es sind auch andere Prozessgase möglich. Insbesondere wird ein Prozessgas gewählt, dass im Kreisprozess nicht kondensiert. Das Verdunstungsfluid weist vorzugsweise eine hohe Verdunstungswärme bei relativ geringem Volumenzuwachs in der Dampfphase auf, sodass die Erhöhung der Verdichtungsarbeit aufgrund des Volumenzuwachses kleiner ist als die Reduktion der Verdichtungsarbeit aufgrund der Nassverdichtung. Die Dampfkurve des Verdunstungsfluid entspricht vorzugsweise den im Kreisprozess angestrebten Drücken und Temperaturen. Das Verdunstungsfluid weist vorzugsweise Wasser oder Alkohol (z.B. Methanol, Ethanol) auf, vorzugsweise besteht es aus diesem. Alkohole sind insbesondere in Verbindung mit Edelgas als Prozessgas bevorzugt, da dieses inert ist und somit die Brandgefahr reduziert ist.

Die Einspritzung des Verdunstungsfluids kann kontinuierlich oder diskontinuierlich erfolgen. Die Expansionsmaschine kann beispielsweise eine Turbine, eine Verdrängungsmaschine oder eine Kolbenmaschine sein.

Es ist bevorzugt, wenn das durch das Kondensationskühlen des Prozessgases abgeschiedene Verdunstungsfluid rückgeführt wird zum Einspritzen zu dem Prozessgas. Vorzugsweise wird also auch das Verdunstungsfluid in einem geschlossenen Kreislauf geführt. D.h. es ist ein Flüssigkeitskreislauf für das Verdunstungsfluid vorgesehen. Vorzugsweise ist jedoch (ggf. zusätzlich) ein Reservoir für das Verdunstungsfluid vorgesehen. Vorzugsweise ist eine Pumpe vorgesehen, die das rückgewonnene Verdunstungsfluid zur Einspritzvorrichtung pumpt (insbesondere um eine gute Zerstäubung zu erreichen). Prozessbedingt kann jedoch auch ein Druckgefälle vom Kondensationskühler zur Einspritzvorrichtung vorhanden sein. Der Kondensationskühler ist vorzugsweise ein Wärmetauscher.

Optional wird das Prozessgas direkt mit Umgebungsluft und/oder Kühlluft gekühlt.

Optional wird das Prozessgas indirekt durch eine Kühlflüssigkeit gekühlt.

Optional wird die von der Kühlflüssigkeit (oder der Kühlluft) abgeführte Wärme in einem Niedertemperaturwärmetauscher abgegeben. Somit kann diese Wärme effizient verwendet werden. Bei indirekter Kühlung ist eine hohe Energiemenge jedoch bei niedriger Temperatur nutzbar, beispielsweise für Flächenheizungen oder Vorwärmung.

Vorzugsweise erfolgt die Einspritzung des Verdunstungsfluids bei einem Druck, der unter dem Atmosphärendruck und/oder einem Umgebungsdruck liegt. Unter dem Atmosphärendruck wird insbesondere ein Druck von 1013,25 hPa verstanden. Verdunstungsfluid-Prozessgas-Kombinationen können besonders effektiv genutzt werden, wenn der Druck im Kreislauf nach Expansion unter Umgebungsdruck liegt.

Vorzugsweise wird beim Expandieren des Prozessgases abgegebene mechanische Arbeit an einen Generator abgegeben, sodass der Generator angetrieben wird. D.h., der Generator wird von der Expansionsmaschine angetrieben. Der Generator kann ein Verbraucher sein. Es ist also ein Generatorbetrieb oder ein direkter Antrieb von Verdichtern, Pumpen und dergleichen möglich.

Es ist bevorzugt, wenn zum Erwärmen des Prozessgases in einem Wärmetauscher Wärme von einem Arbeitsfluid auf das Prozessgas übertragen wird, insbesondere im Gegenstromprinzip. Die Wärme kann aus einer beliebigen Quelle kommen: Beispielsweise Abgas aus einem anderen Prozess (Motor, Gasturbine, Hochtemperatur-Brennstoffzelle, Ofen, etc.), Abwärme oder auch direkt für diesen Kreisprozess erzeugt durch Verbrennung. Der Wärmetauscher dient also der Energiezufuhr. Bevorzugt liegt im Wärmetauscher eine hohe Temperaturdifferenz (zwischen Prozessgas und Arbeitsfluid) vor, vorzugsweise beträgt die Temperaturdifferenz mehr als 100°C, besonders bevorzugt mehr als 250°C.

Es ist vorteilhaft, wenn beim Einspritzen des Verdunstungsfluids das Verdunstungsfluid vernebelt wird.

Es ist vorteilhaft, wenn das Einspritzen eines Verdunstungsfluids über eine Sättigung des Prozessgases hinaus erfolgt. D.h., dass mehr Verdunstungsfluid eingespritzt wird, als für die Sättigung des Prozesses erforderlich wäre. Insbesondere wird nach der Expansion des Prozessgases mehr Verdunstungsfluid eingespritzt als durch Verdunstung (und damit einhergehender Kühlung des Prozessgases, bis zum Erreichen der Sättigung bei Dampfdruck des Verdunstungsfluids) vom Prozessgas aufgenommen werden kann. Das überschüssige Verdunstungsfluid verbleibt insbesondere in Form von Tröpfchen oder (noch besser) Nebel thermodynamisch vorerst irrelevant in der Flüssigphase. Insbesondere erst während der anschließenden Verdichtung erhöht sich die Temperatur im Prozessgas und somit auch der Dampfdruck des Verdunstungsfluids, was weitere Verdunstung und damit Kühlung während des Verdichtungs Vorgangs bewirkt. Dieser Vorgang erfolgt insbesondere kontinuierlich während der Verdichtung, aufgrund der zu Beginn vorliegenden erheblichen Flüssigphase auch Nassverdichtung genannt. Auch bei dieser Verdichtung erhöht sich die Temperatur, jedoch durch die (insbesondere kontinuierliche) Verdunstung deutlich geringer als bei einer „trockenen“ Verdichtung, was wiederum eine deutlich reduzierte Verdichtungsarbeit bewirkt. Vorzugsweise erfolgt das Einspritzen des Verdunstungsfluids derart, dass das Prozessgas auch während der Verdichtung gesättigt ist. D.h., vorzugsweise wird mehr Verdunstungsfluid eingespritzt, als vom Prozessgas auch während der Verdichtung aufgenommen werden kann.

Es ist vorteilhaft, wenn das Verdichten des Prozessgases zumindest teilweise als Nassverdichtung erfolgt, wobei das Verdunstungsfluid verdunstet. Die zum jeweiligen thermodynamischen Zustand in der Verdichtungsphase verdunstende Menge des Verdunstungsfluids wird durch dessen Dampfdruck bestimmt (d.h. dem Dampfdruck des Verdunstungsfluids in Abhängigkeit der Temperatur). Bei Verdunstung bis zum Erreichen des Dampfdrucks (d.h. dem Partialdruck des Verdunstungsfluids) spricht man von Sättigung. (Spezielle Effekte wie Unterkühlung von Dampf oder Überhitzung von Flüssigkeit kann man in dieser Betrachtung vernachlässigen) Die sinnvoll einzuspritzende Verdunstungsfluidmenge

orientiert sich insbesondere an der Verdichtungsendtemperatur und deren korrespondierendem Dampfdruck. Es ist bevorzugt, das Verdunstungsfluid überzudosieren, da der Flüssigkeitsüberschuss ohnehin gemeinsam mit der Kondensatabscheidung bei der Kondensationskühlung zurückgewonnen wird. Von der eingespritzten Menge des Verdunstungsfluids verdunsten vorzugsweise zwischen 50% und 80% erst während der Verdichtung. Diese Mengen sind bei Wasser und Alkoholen insbesondere möglich, wenn der Druck im Kreisprozess vor der Verdichtung unter Umgebungstemperatur liegt („flache“ Dampfkurve).

Es ist bevorzugt, wenn das Verdichten des Prozessgases angetrieben wird von beim Expandieren des Prozessgases abgegebener mechanischer Arbeit. Vorzugsweise sind die Expansionsmaschine und der Verdichter über eine Welle verbunden. Durch die Verdunstungskühlung ist die beim Expandieren erzeugte Arbeit größer als die zum Verdichten aufzuwendende Arbeit. Alternativ kann der Verdichter auch indirekt angetrieben werden, beispielsweise elektrisch.

Es ist bevorzugt, wenn das Expandieren des Prozessgases, das Einspritzen eines Verdunstungsfluids und das Verdichten des Prozessgases in einer Kammer (d.h. in einem Zylinder) einer Kolbenmaschine erfolgt. In der Kolbenmaschine kann optional (analog zu einem Diesel-Verbrennungsmotor) die Einspritzung kontinuierlich oder mehrfach während der Verdichtung erfolgen, womit eine bessere Verdunstung erzielt wird. D.h., es muss nicht die gesamte Menge Verdunstungsfluid vor Beginn der Verdichtung eingebracht werden, sondern dies erfolgt auch während des Verdichtens. Das Verdichten erfolgt insbesondere trotzdem unter kontinuierlicher Verdunstung.

Es ist bevorzugt, wenn die Kolbenmaschine mehrere Kammern (d.h. mehrere Zylinder) aufweist, wobei in jeder der mehreren Kammern das Expandieren des Prozessgases, das Einspritzen eines Verdunstungsfluids und das Verdichten des Prozessgases erfolgt.

Es ist vorteilhaft, wenn das Expandieren des Prozessgases, das Einspritzen eines Verdunstungsfluids und das Verdichten des Prozessgases in den mehreren Kammern phasenversetzt erfolgt. Bei-

spielsweise könnte der Prozess bei einer Kolbenmaschine mit drei Kammern folgendermaßen ablaufen:

	Zeit 1	Zeit 2	Zeit 3
Erste Kammer	Expandieren	Einspritzen	Verdichten
Zweite Kammer	Einspritzen	Verdichten	Expandieren
Dritte Kammer	Verdichten	Expandieren	Einspritzen

Es ist bevorzugt, wenn ein Vorrat an Prozessgas vorgesehen ist und die Prozessgasmenge im geschlossenen Kreislauf durch Zufuhr von Prozessgas aus dem Vorrat (insbesondere zum Ausgleich von Leckverlusten) kontinuierlich oder diskontinuierlich konstant gehalten wird. Insbesondere im Falle einer nicht-hermetischen Bauform ist ein zusätzlicher Bedarf an Prozessgas denkbar. Vorzugsweise erfolgt die Regelung des zuzuführenden Prozessgases anhand einer Druckmessung des Prozessgases im Kreisprozess. Ferner kann ein Prozessgasvorrat vorgesehen sein, mit dem das mittlere Druckniveau gehoben und/oder gesenkt werden kann, um für unterschiedliche Lastzustände die thermodynamischen Randbedingungen optimal zu nutzen.

Es ist vorteilhaft, wenn das Prozessgas ein Edelgas aufweist, insbesondere ein Edelgas ist.

Bezugnehmend auf die erfindungsgemäße Vorrichtung ist es bevorzugt, eine Rückführleitung zum Rückführen von Verdunstungsfluid zur Einspritzvorrichtung vorgesehen ist.

Vorzugsweise ist ein Reservoir zum Bereithalten von Verdunstungsfluid für die Einspritzvorrichtung vorgesehen.

Vorzugsweise weist die Einspritzvorrichtung eine Pumpe auf.

Es ist bevorzugt, wenn die Einspritzvorrichtung mehrere Einspritzelemente zum Einspritzen des Verdunstungsfluid an mehreren Stellen aufweist. Jedes Einspritzelement ist zum Einspritzen an einer Stelle vorgesehen, sodass in Summe an mehreren Stellen eingespritzt werden kann. Dies ist insbesondere vorteilhaft bei mehrstufigen Verdichter-Strömungsmaschinen, wobei in jedem Zwischendruckniveau Verdunstungsfluid eingespritzt wird. Vorteil-

hafterweise erfolgt damit weniger Tröpfchenbeschuss der Laufräder der Verdichter-Strömungsmaschine durch weniger Flüssigphase.

Es ist vorteilhaft, wenn eine Einspritzzone vorgesehen ist, wobei die Einspritzvorrichtung in der Einspritzzone vorgesehen ist, wobei die Einspritzzone insbesondere von der Expansionsmaschine und dem Verdichter getrennt ist (und vorzugsweise zwischen diesen liegt bezogen auf die Führung des Prozessgases). Alternativ oder zusätzlich ist beispielsweise auch eine Einspritzung im Verdichter möglich.

Es ist vorteilhaft, wenn die Expansionsmaschine eine Turbine, eine Verdrängungsmaschine und/oder eine Kolbenmaschine aufweist.

Es ist vorteilhaft, wenn der Verdichter eine Turbine, eine Verdrängungsmaschine und/oder eine Kolbenmaschine aufweist.

Es ist bevorzugt, wenn die Vorrichtung eine Kolbenmaschine mit zumindest einer Kammer aufweist, wobei die zumindest eine Kammer jeweils die Expansionsmaschine und den Verdichter darstellt und die Einspritzvorrichtung zur Einspritzung des Verdunstungsfluids in jeweils die zumindest eine Kammer eingerichtet ist.

Vorteilhafterweise weist die Vorrichtung einen Generator auf, der mit der Expansionsmaschine verbunden ist.

Vorzugsweise ist ein Vorratsbehälter zum Vorrätighalten von Prozessgas vorgesehen.

Die Erfindung kann beispielsweise Großmotoren nachgeschaltet werden oder zur allgemeinen mechanischen Abwärme-/Abgasnutzung verwendet werden.

Im Folgenden wird die Erfindung anhand von in den Figuren gezeigten bevorzugten Ausführungsbeispielen näher erläutert.

Fig. 1 zeigt schematisch eine bevorzugte Ausführungsform der Vorrichtung zur Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Energie.

Fig. 2A zeigt ein p - v -Diagramm zur Prozessführung in der Ausführungsform gemäß Fig. 1.

Fig. 2B zeigt ein T - s -Diagramm zur Prozessführung in der Ausführungsform gemäß Fig. 1.

Fig. 2C zeigt ein $\log(p)$ - T -Diagramm zur Prozessführung in der Ausführungsform gemäß Fig. 1.

Fig. 3 zeigt schematisch eine weitere bevorzugte Ausführungsform der Vorrichtung.

Fig. 4 zeigt schematisch eine weitere bevorzugte Ausführungsform der Vorrichtung.

Fig. 5 illustriert schematisch eine bevorzugte Ausführungsform eines Teils der Vorrichtung.

Fig. 6A zeigt schematisch eine weitere bevorzugte Ausführungsform der Vorrichtung mit einer Kolbenmaschine.

Fig. 6B zeigt ein Ablaufdiagramm eines Zyklus der Kolbenmaschine der Fig. 6A.

Fig. 1 zeigt schematisch eine bevorzugte Ausführungsform der Vorrichtung 1 zur Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Energie. Insbesondere zeigt Fig. 1 ein Fließschema der Vorrichtung 1.

Die Vorrichtung 1 weist einen Wärmetauscher 2 zum Erwärmen eines Prozessgas. Wärme wird im Wärmetauscher 2 von einem Arbeitsfluid bevorzugt im Gegenstromprinzip auf das Prozessgas übertragen. Es ist ein Zufluss 14 für das Arbeitsfluid zum Wärmetauscher 2 und ein Abfluss 15 für das Arbeitsfluid vom Wärmetauscher 2 vorgesehen ist. Der zugeführte Energiestrom ist mit BA und der abgeführte Energiestrom mit BB illustriert. Das erwärmte Prozessgas wird in eine Expansionsmaschine 3 zur Expansion des Prozessgases unter Abgabe von mechanischer Arbeit expandiert. Ein Generator 11 zur Stromerzeugung ist mit der Expansionsmaschine 3 verbunden und wird von dieser angetrieben. Das expandierte Prozessgas wird

mit einer Einspritzvorrichtung 4 zur Einspritzung eines Verdunstungsfluids zu dem Prozessgas zur Verdunstungskühlung des Prozessgases gekühlt. Die Einspritzung des Verdunstungsfluids erfolgt bei einem Druck, der unter dem Atmosphärendruck liegt. Das Verdunstungsfluid wird beim Einspritzen vernebelt. Das Einspritzen des Verdunstungsfluids erfolgt über eine Sättigung des Prozessgases hinaus, d.h. es wird mehr Verdunstungsfluid eingespritzt, als das Prozessgas aufnehmen kann. Es ist eine Einspritzzone 10 vorgesehen, in der die Einspritzung erfolgt und die in dieser Ausführungsform von der Expansionsmaschine und dem Verdichter getrennt ist.

Das verdunstungsgeköhlte Prozessfluid wird in einem einen Verdichter 5 verdichtet. Die Verdichtung erfolgt als Nassverdichtung, wobei das Verdunstungsfluid zumindest teilweise verdunstet. Indem bei der Verdunstungskühlung Verdunstungsfluid über die Sättigung des Prozessgases eingespritzt wurde, kann eine weitere Kühlung bei der Verdichtung erfolgen. Das verdichtete Prozessgas wird in einem Kondensationskühler 6 abgekühlt und das Verdunstungsfluid im Kondensationskühler 6 (zumindest teilweise) kondensiert und abgeschieden. Anschließend wird das Prozessgas wieder zum Wärmetauscher 2 geführt. Somit wird das Prozessgas in der Vorrichtung in einem geschlossenen Kreislauf geführt.

In dieser Ausführungsform wird das Prozessgas im Kondensationskühler 6 indirekt mit einer Kühlflüssigkeit gekühlt, wobei die von der Kühlflüssigkeit abgeführte Wärme in einem Niedertemperaturwärmetauscher 13 abgegeben wird. Die Vorrichtung weist eine Rückführleitung 7 zum Rückführen von Verdunstungsfluid zur Einspritzvorrichtung 4 auf. Die Rückführleitung 7 führt über ein Reservoir 8 zum Bereithalten von Verdunstungsfluid für die Einspritzvorrichtung 4. Es ist eine Pumpe 9 vorgesehen, zum Pumpen des Verdunstungsfluids zur Einspritzvorrichtung 5. Auf die Pumpe 9 kann auch verzichtet werden, da in der Regel ein Druckgefälle vom Kondensationskühler zur Einspritzvorrichtung vorliegt.

Eine beispielhafte Prozessführung beim erfindungsgemäßen Verfahren wird anhand dem in Fig. 2A gezeigten p-v-Diagramm, dem in Fig. 2B gezeigten T-s-Diagramm näher erläutert und dem in Fig. 2C gezeigten $\log(p)$ -T-Diagramm näher erläutert. In der den Druck

und die Temperatur des Prozessgases zeigenden Fig. 2C ist außerdem die Sättigungskurve 22 des Verdunstungsfluids eingezeichnet. Diese veranschaulichen die Verhältnisse an den folgenden Punkten, die auch in Fig. 1 illustriert sind:

- E: nach dem Kondensationskühler 6
- A: nach dem Wärmetauscher 2
- B: nach der Expansionsvorrichtung 3
- C: nach der Einspritzvorrichtung 4
- D: nach der Rückverdichtung mit dem Verdichter 5.

Der Punkt D' illustriert die Abweichung von dieser Prozessführung im inversen Brayton-Cycle.

Punkt E:

- Prozessgas liegt mit Restmenge an Verdunstungsfluid vor
 - Partialdruck = Dampfdruck und somit abhängig von Druck p_A und Temperatur T_E
- Temperatur T_E
 - bei Abwärmenutzung über Temperatur der Niedertemperaturwärmeabfuhr (siehe Niedertemperaturwärmetauscher 13), z.B. zwischen $+40^\circ\text{C}$ und $+60^\circ\text{C}$
 - bei direkter Kühlung mittels Luft zumindest über Umgebungstemperatur
 - bei Kühlwasser z.B. aus Fließgewässer auch tiefere Temperaturen möglich
- Druck $p_E \sim p_A$ ist auf Atmosphärendruck (oder in dieser Größenordnung) oder darüber
 - grundsätzlich nach oben hin unbegrenzt, jedoch bei hohen Drücken Verdunstungskühlung bei Nassverdichtung nur beschränkt möglich
 - in der praktischen Umsetzung Druckverhältnis p_A/p_B begrenzend und $p_B < \text{Atmosphärendruck}$ für gute Verdunstungskühlung sinnvoll. Daher bevorzugt $p_A < 10 \text{ bar}_a$ (bar absolut), besonders bevorzugt $p_A < 5 \text{ bar}_a$, noch mehr bevorzugt $p_A < 3 \text{ bar}_a$ oder $p_A < 2 \text{ bar}_a$
 - $p_A < \text{Atmosphärendruck}$ möglich mit positivem Einfluss auf Verdunstung (jedoch unter Umständen schwieriger Kondensation und geringer Prozessgasdichte im ohnehin schon groß zu bauenden Wärmetauscher 2)

Punkt A:

- Prozessgas und Verdunstungsfluid unverändert zu E
- Druck $p_A \sim p_E$
- Temperatur T_A
 - je höher die Temperatur, desto höher der erzielbare Wirkungsgrad
 - besonders vorteilhafter Einsatz ab ca. $T_A = +300^\circ\text{C}$ (bis zur Materialeinsatzgrenze der Bauteile)
 - praktisch begrenzt die Temperatur des zur Verfügung stehenden Energiestroms BA die erzielbare Temperatur. vorzugsweise liegt die Temperatur T_A zwischen $+300$ und $+600^\circ\text{C}$
 - Anwendung nach Anlagen mit z.B. Magerbrennverfahren bis T_A 150°C möglich

Punkt B:

- Prozessgas und Verdunstungsfluid unverändert zu A
- Druck p_B
 - vorzugsweise $p_B < \text{Atmosphärendruck}$ für gute Verdunstungskühlung
 - besonders bevorzugt $p_B < 0,7 \text{ bar}_a$, noch mehr bevorzugt $p_B < 0,5 \text{ bar}_a$
 - in der praktischen Umsetzung Druckverhältnis p_A/p_B begrenzend
- Temperatur T_B
 - je nach p_A/p_B und Wirkungsgrad der Expansion sich einstellend

Punkt C:

- kleiner Teil des eingespritzten Verdunstungsfluids verdampft
 - niedriger p_B begünstigt, jedoch sinkende Temperatur begrenzt Verdunstung
- Druck $p_C \sim p_B$
- Temperatur T_C
 - durch Verdunstungskühlung Temperaturen unter Umgebungstemperatur möglich
 - somit ist die Verdunstung im Vorteil gegenüber dem dem Stand der Technik (insbesondere iBC), welcher an dieser Stelle durch Wärmetauscher nur begrenzte Temperaturen erreichen kann

Punkt D:

- restlicher Teil des eingespritzten Verdunstungsfluids verdampft während Verdichtung
 - steigender Druck begrenzt, jedoch begünstigt die in der Verdichtung steigende Temperatur die Verdunstung während des Druckanstiegs
 - Druck- und Temperaturverlauf des Prozessgases in der Verdichtung möglichst nahe an der Dampfkurve des Verdunstungsfluids angenähert
 - Dampfanteil des verdunstenden Fluids muss mit verdichtet werden, d.h. die signifikant bessere Prozesseffizienz im T-s-Diagramm (Fig. 2B) A-B-C-D gegenüber dem Stand der Technik (insbesondere dem iBC mit der Prozessführung A-B-C-D', das in Fig. 2A und 2B ebenfalls eingezeichnet ist) wird durch eine Mehrarbeit in der Verdichtung des Dampfes gemindert, siehe p-v-Diagramm (Fig. 2A)
- Druck p_A
- Temperatur T_D
 - je nach p_A/p_B , verdunstetem Fluid und Wirkungsgrad der Verdichtung sich einstellend
- nicht verdunstetes Fluid
 - z.B. durch zu viel Einspritzung, dynamischer Betrieb oder unzureichende Zerstäubung

zurück zu Punkt E:

- Druck p_A
- Temperatur T_E
 - geringe Temperaturdifferenz T_D auf T_E bewirkt durch den gegenüber p_B relativ hohen Druck p_A eine starke Kondensation
 - z.B. bei $p_A = 1 \text{ bar}_a$ bewirkt ein Abkühlen von $T_D = +65^\circ\text{C}$ auf $T_E = +45^\circ\text{C}$ je nach Fluid und Prozessgas ein Kondensieren von über 60% des Verdunstungsfluidgehalts
 - trotz geringer Temperaturdifferenz wird über den Wärmetauscher 6 infolge Kondensation eine erhebliche Wärmemenge abgeführt
- nicht kondensiertes Verdunstungsfluid
 - bleibt als rezirkulierende Restmenge im Prozessgas

Vorzugsweise erfolgt von B zu C eine isobare Kühlung durch Verdunstung. Insbesondere im Falle einer Kolbenmaschine erfolgt (im

idealisierten Prozess) von B zu C eine isochore Kühlung und der Prozess wird zwischen spezifischen Volumina v_A und v_B anstatt den Drücken p_A und p_B geführt.

Fig. 3 zeigt schematisch eine weitere bevorzugte Ausführungsform der Vorrichtung 1 zur Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Energie. Diese ist im Wesentlichen gleich ausgeführt wie die in Fig. 1 dargestellte Ausführungsform, sodass für gleiche Elemente gleiche Bezugszeichen verwendet werden und im Folgenden nur die Unterschiede erläutert werden. Insbesondere zeigt Fig. 3 ein Fließschema der Vorrichtung 1.

Die Ausführungsform der Fig. 3 weist zusätzlich einen Vorratsbehälter 12 zum Vorrätighalten von Prozessgas auf. Damit kann die Prozessgasmenge im geschlossenen Kreislauf durch Zufuhr von Prozessgas aus dem Vorrat konstant gehalten und Leckverluste ausgeglichen werden.

Fig. 4 zeigt illustriert den Aufbau einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Vorrichtung 1 zur Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Energie. Gleiche Elemente sind mit den gleichen Bezugsziffern wie in Fig. 1 versehen und es werden nur die Unterschiede erläutert. Insbesondere kann die in Fig. 4 gezeigte Ausführungsform auch der in Fig. 1 als Fließschema gezeigten Ausführungsform entsprechen.

In dieser Ausführungsform ist die Expansionsmaschine 3 mit dem Verdichter 5 über eine Welle 16 verbunden und treibt diesen an. Die Welle 16 treibt ebenfalls den Generator 11 an.

Fig. 5 illustriert schematisch eine bevorzugte Ausführungsform eines Teils der Vorrichtung 1 zur Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Energie, insbesondere der Einspritzvorrichtung 4 und des Verdichters 5.

In dieser Ausführungsform weist die Einspritzvorrichtung 4 mehrere Einspritzelemente 4a, 4b zum Einspritzen des Verdunstungsfluids an mehreren Stellen auf. Der Verdichter 5 weist mehrere Verdichterstufen 5a, 5b auf. Das Einspritzen des Verdunstungsfluids und das Verdichten erfolgt dabei abwechselnd. Somit kann

Erosion durch Wasserbeschuss am Verdichter 5 bzw. den Verdichterstufen 5a, 5b verringert werden. Vorzugsweise wird mit jedem Einspritzelement 4a, 4b eine Menge an Verdunstungsfluid eingespritzt, sodass dieses jeweils über Sättigung des Prozessgases vorliegt, wobei bei bzw. nach jeder Verdichterstufe 5a, 5b jeweils mehr Verdunstungsfluid vom Prozessgas aufgenommen werden kann. Diese Teilausführungsform kann beispielsweise bei der Ausführungsform der Fig. 1 oder Fig. 2 vorgesehen sein.

Fig. 6A zeigt schematisch eine weitere bevorzugte Ausführungsform der Vorrichtung 1. Diese ist ähnlich ausgeführt wie die in Fig. 1 dargestellte Ausführungsform, sodass für gleiche Elemente gleiche Bezugszeichen verwendet werden und im Folgenden nur die Unterschiede erläutert werden.

In dieser Ausführungsform ist eine Kolbenmaschine 17 mit einer Kammer (bzw. einem Zylinder) 18 vorgesehen. Diese bildet die Expansionsmaschine 3 und den Verdichter 5. Die Einspritzvorrichtung 4 ist zur Einspritzung des Verdunstungsfluids in die Kammer 18 der Kolbenmaschine 17 eingerichtet. Somit erfolgt das Expandieren des Prozessgases, das Einspritzen des Verdunstungsfluids und das Verdichten des Prozessgases in der Kammer 18 der Kolbenmaschine 17.

Auch eine Ausführung mit mehreren Kammern bzw. Zylindern 18 ist möglich, in denen jeweils das Verdichten, Einspritzen und Expandieren erfolgt.

Fig. 6B zeigt ein Ablaufdiagramm eines Zyklus der Kolbenmaschine 17 der Fig. 6A. Auf der Abszissenachse ist der Kurbelwinkel ($^{\circ}\text{CA}$) der Kolbenmaschine 17 aufgetragen, wobei BDC für bottom dead center (unterer Totpunkt) und TDC für top dead center (oberer Totpunkt) stehen. Das Expandieren des Prozessgases erfolgt somit vom Punkt TDC zum Punkt BDC (wobei am Anfang dieses Bereichs das Ansaugen 21 des Prozessgases erfolgt), das Verdichten vom Punkt BDC zum Punkt TDC (wobei am Ende dieses Bereichs das Ausstoßen 20 des Prozessgases erfolgt). Das Einspritzen 19 des Verdunstungsfluids erfolgt ab dem Punkt BDC bis zum Ausstoßen des Prozessgases.

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Energie, mit den Schritten:
 - Erwärmen eines Prozessgas;
 - Expandieren des Prozessgases unter Abgabe von mechanischer Arbeit;
 - Einspritzen eines Verdunstungsfluids zu dem Prozessgas zur Verdunstungskühlung des Prozessgases;
 - Verdichten des Prozessgases;dadurch gekennzeichnet, dass das Prozessgas in einem geschlossenen Kreislauf geführt wird und das Verfahren weiter den Schritt aufweist:
 - Kondensationskühlen des Prozessgases, wobei das Prozessgas gekühlt wird und das Verdunstungsfluid zumindest teilweise kondensiert und abgeschieden wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das durch das Kondensationskühlen des Prozessgases abgeschiedene Verdunstungsfluid rückgeführt wird zum Einspritzen zu dem Prozessgas.
3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, wobei das Prozessgas direkt mit Umgebungsluft und/oder Kühlluft gekühlt wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei das Prozessgas indirekt durch eine Kühlflüssigkeit gekühlt wird.
5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei die von der Kühlflüssigkeit abgeführte Wärme in einem Niedertemperaturwärmetauscher (13) abgegeben wird.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Einspritzung des Verdunstungsfluids bei einem Druck erfolgt, der unter dem Atmosphärendruck liegt.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei beim Expandieren des Prozessgases abgegebene mechanische Arbeit an einen Generator (11) abgegeben wird, sodass der Generator (11) angetrieben wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zum Erwärmen des Prozessgases in einem Wärmetauscher (2) Wärme von einem Arbeitsfluid auf das Prozessgas übertragen wird, insbesondere im Gegenstromprinzip.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei beim Einspritzen des Verdunstungsfluids das Verdunstungsfluid vernebelt wird.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Einspritzen eines Verdunstungsfluids über eine Sättigung des Prozessgases hinaus erfolgt.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Verdichten des Prozessgases zumindest teilweise als Nassverdichtung erfolgt, wobei das Verdunstungsfluid verdunstet.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Verdichten des Prozessgases angetrieben wird von beim Expandieren des Prozessgases abgegebener mechanischer Arbeit.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Expandieren des Prozessgases, das Einspritzen des Verdunstungsfluids und das Verdichten des Prozessgases in einer Kammer (18) einer Kolbenmaschine (17) erfolgt.

14. Verfahren nach Anspruch 13, die Kolbenmaschine (17) mehrere Kammern (18) aufweist, wobei in jeder der mehreren Kammern (18) das Expandieren des Prozessgases, das Einspritzen eines Verdunstungsfluids und das Verdichten des Prozessgases erfolgt.

15. Verfahren nach Anspruch 14, wobei das Expandieren des Prozessgases, das Einspritzen eines Verdunstungsfluids und das Verdichten des Prozessgases in den mehreren Kammern (18) phasenversetzt erfolgt.

16. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei ein Vorrat an Prozessgas vorgesehen ist und wobei die Prozessgasmenge im geschlossenen Kreislauf durch Zufuhr von Prozessgas aus dem Vorrat zum Ausgleich von Leckverlusten kontinuierlich oder

diskontinuierlich konstant gehalten wird.

17. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Prozessgas ein Edelgas aufweist, insbesondere ein Edelgas ist.

18. Vorrichtung (1) zur Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Arbeit, aufweisend:

- einen Wärmetauscher (2) zum Erwärmen eines Prozessgas;
- eine Expansionsmaschine (3) zur Expansion des Prozessgases unter Abgabe von mechanischer Arbeit;

- eine Einspritzvorrichtung (4) zur Einspritzung eines Verdunstungsfluids zu dem Prozessgas zur Verdunstungskühlung des Prozessgases;

- einen Verdichter (5) zur Verdichtung des Prozessgases; dadurch gekennzeichnet, dass

die Vorrichtung (1) zur Führung des Prozessgases in einem geschlossenen Kreislauf eingerichtet ist und einen Kondensationskühler (6) zur Abkühlung des Prozessgases und zur Kondensation und Abscheidung des Verdunstungsfluids aufweist.

19. Vorrichtung (1) nach Anspruch 18, aufweisend eine Rückführung (7) zum Rückführen von Verdunstungsfluid zur Einspritzvorrichtung (4).

20. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 oder 19, aufweisend ein Reservoir (8) zum Bereithalten von Verdunstungsfluid für die Einspritzvorrichtung (4).

21. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 bis 20, wobei die Einspritzvorrichtung (4) eine Pumpe (9) aufweist.

22. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 bis 21, wobei die Einspritzvorrichtung (4) mehrere Einspritzelemente (4a, 4b) zum Einspritzen des Verdunstungsfluid an mehreren Stellen aufweist.

23. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 bis 22, aufweisend eine Einspritzzone (10), wobei die Einspritzvorrichtung (4) in der Einspritzzone (10) vorgesehen ist, wobei die Einspritzzone (10) insbesondere von der Expansionsmaschine (3) und dem Ver-

dichter (5) getrennt ist.

24. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 bis 23, wobei die Expansionsmaschine (3) eine Turbine, eine Verdrängungsmaschine und/oder eine Kolbenmaschine aufweist.

25. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 bis 24, wobei der Verdichter (5) eine Turbine, eine Verdrängungsmaschine und/oder eine Kolbenmaschine aufweist.

26. Vorrichtung (1) einem der Ansprüche 18 bis 25, aufweisend eine Kolbenmaschine mit zumindest einer Kammer, wobei die zumindest eine Kammer jeweils die Expansionsmaschine (3) und den Verdichter (5) darstellt und die Einspritzvorrichtung (4) zur Einspritzung des Verdunstungsfluids in jeweils die zumindest eine Kammer eingerichtet ist.

27. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 bis 26, aufweisend einen Generator (11), der mit der Expansionsmaschine (3) verbunden ist.

28. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 bis 28, aufweisend einen Vorratsbehälter (12) zum Vorrätighalten von Prozessgas.

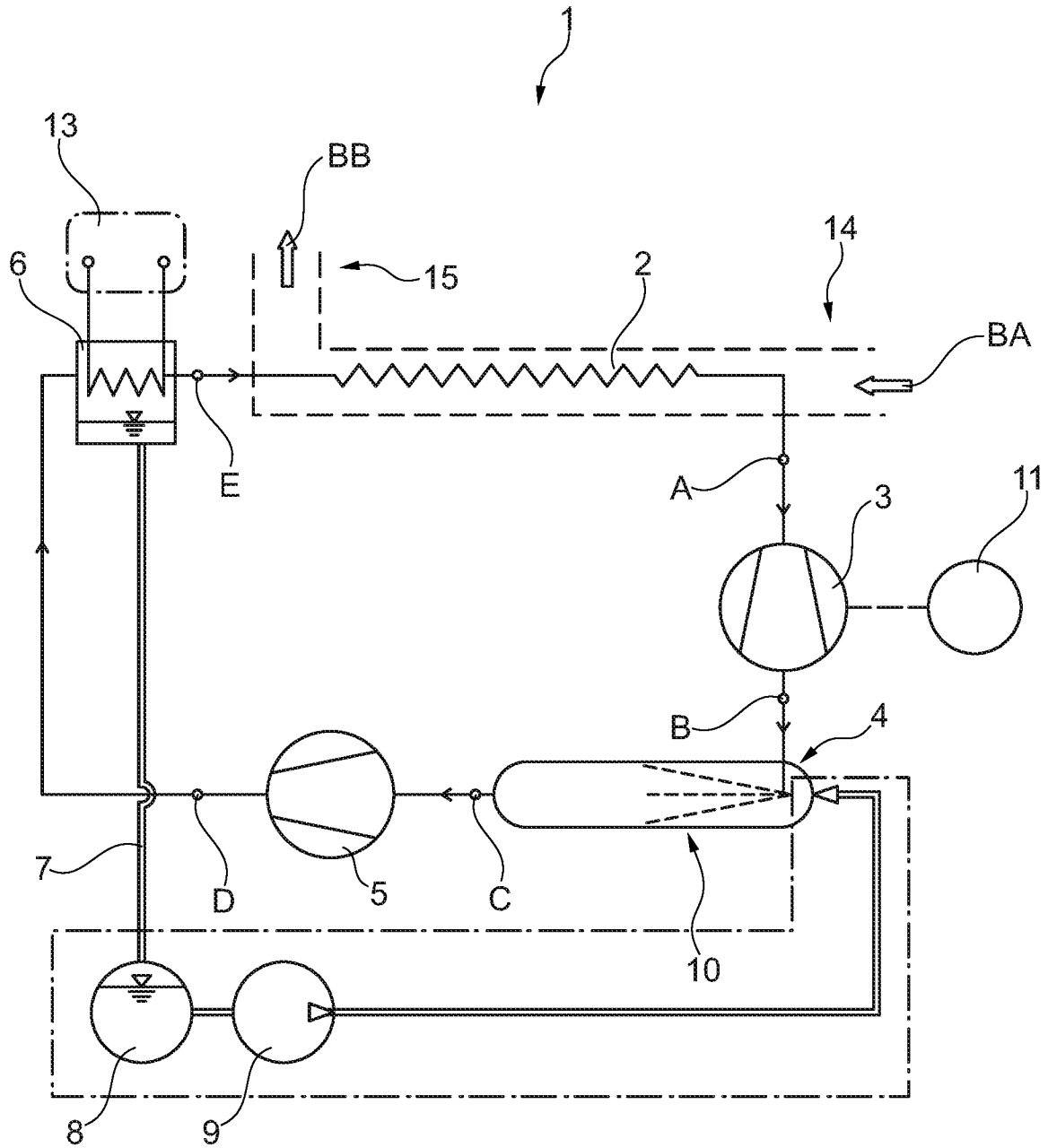


Fig. 1

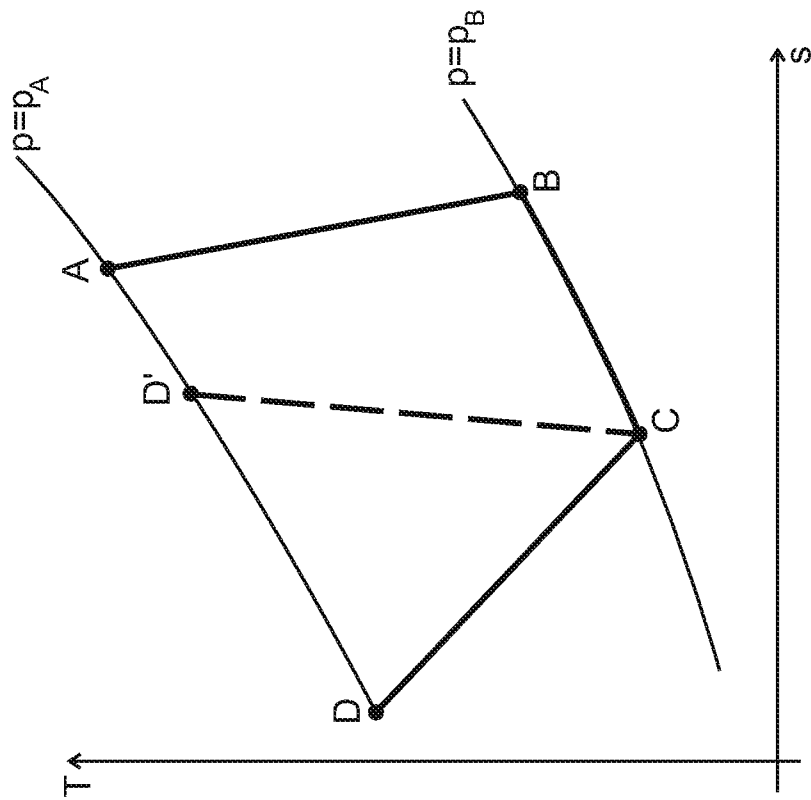


Fig. 2B

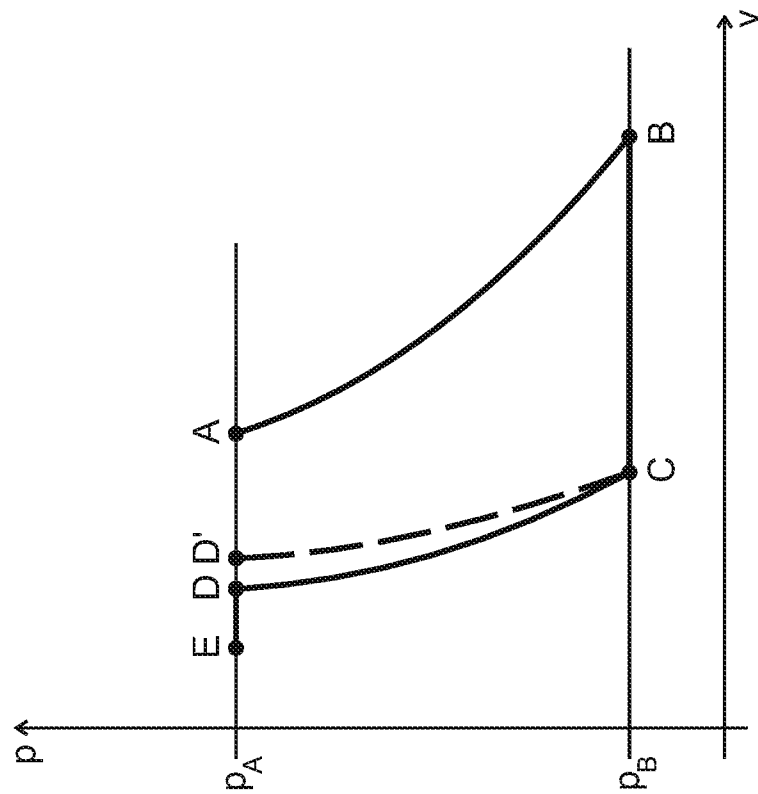


Fig. 2A

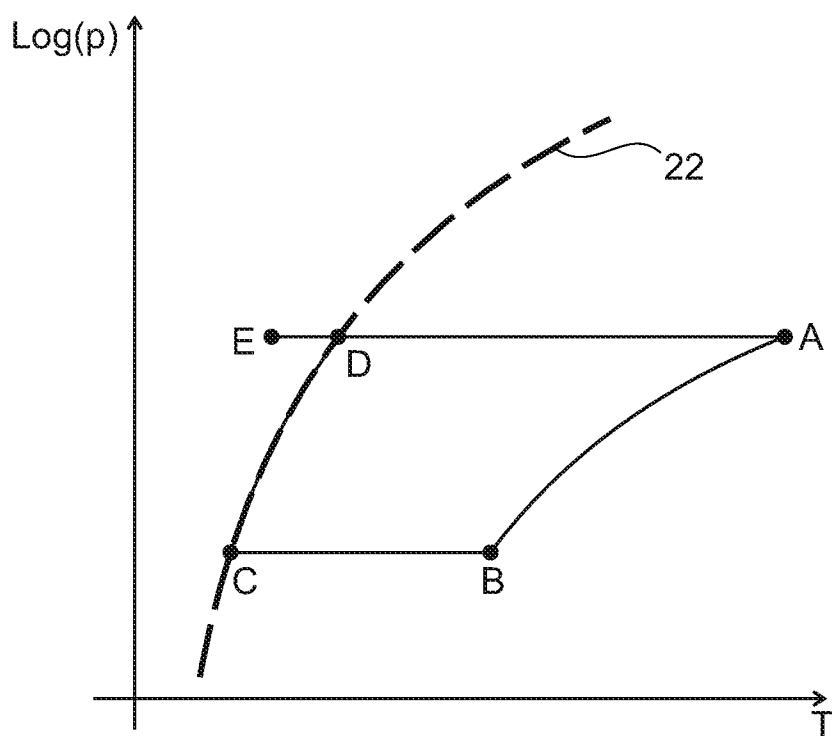


Fig. 2C

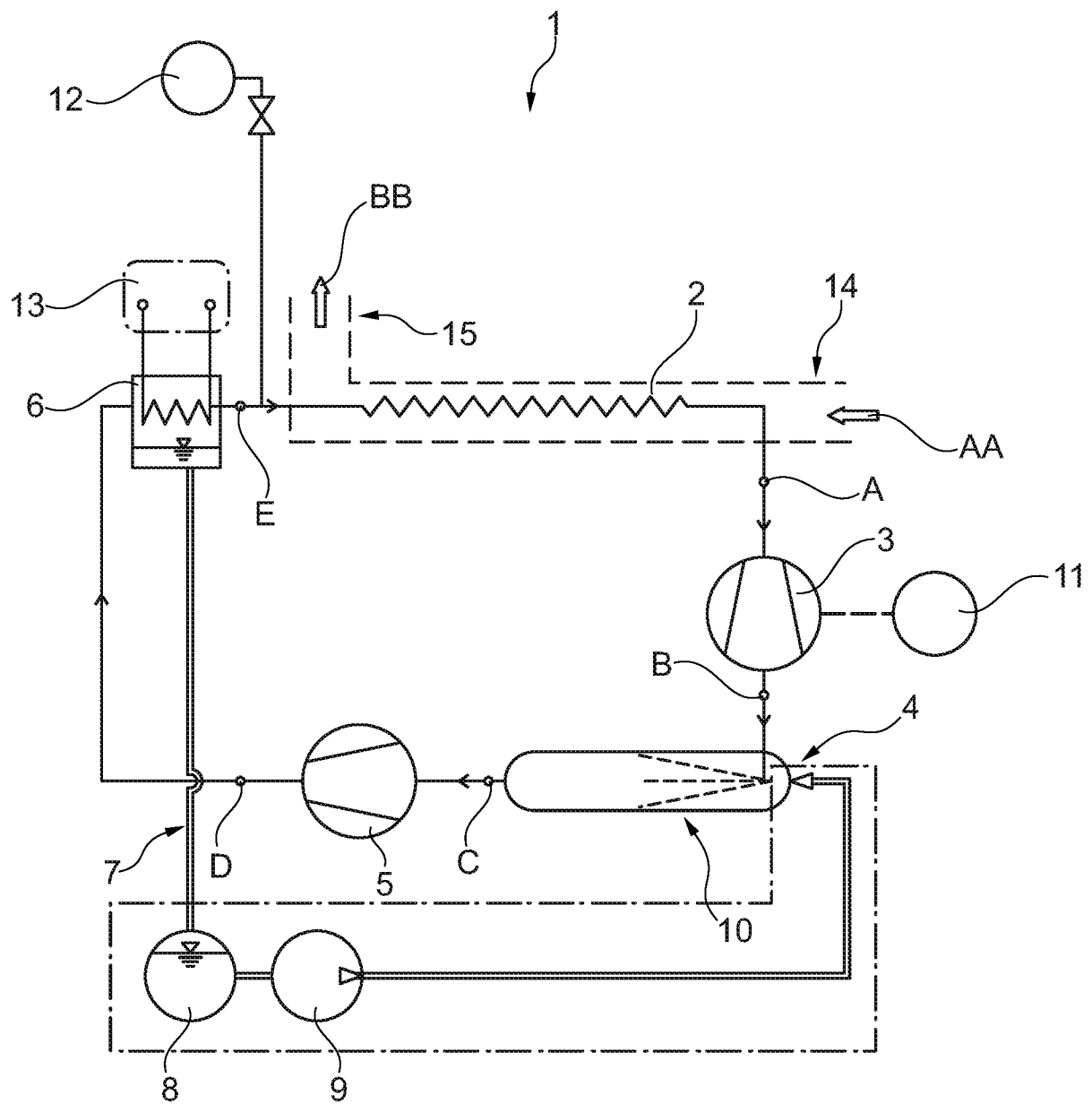


Fig. 3

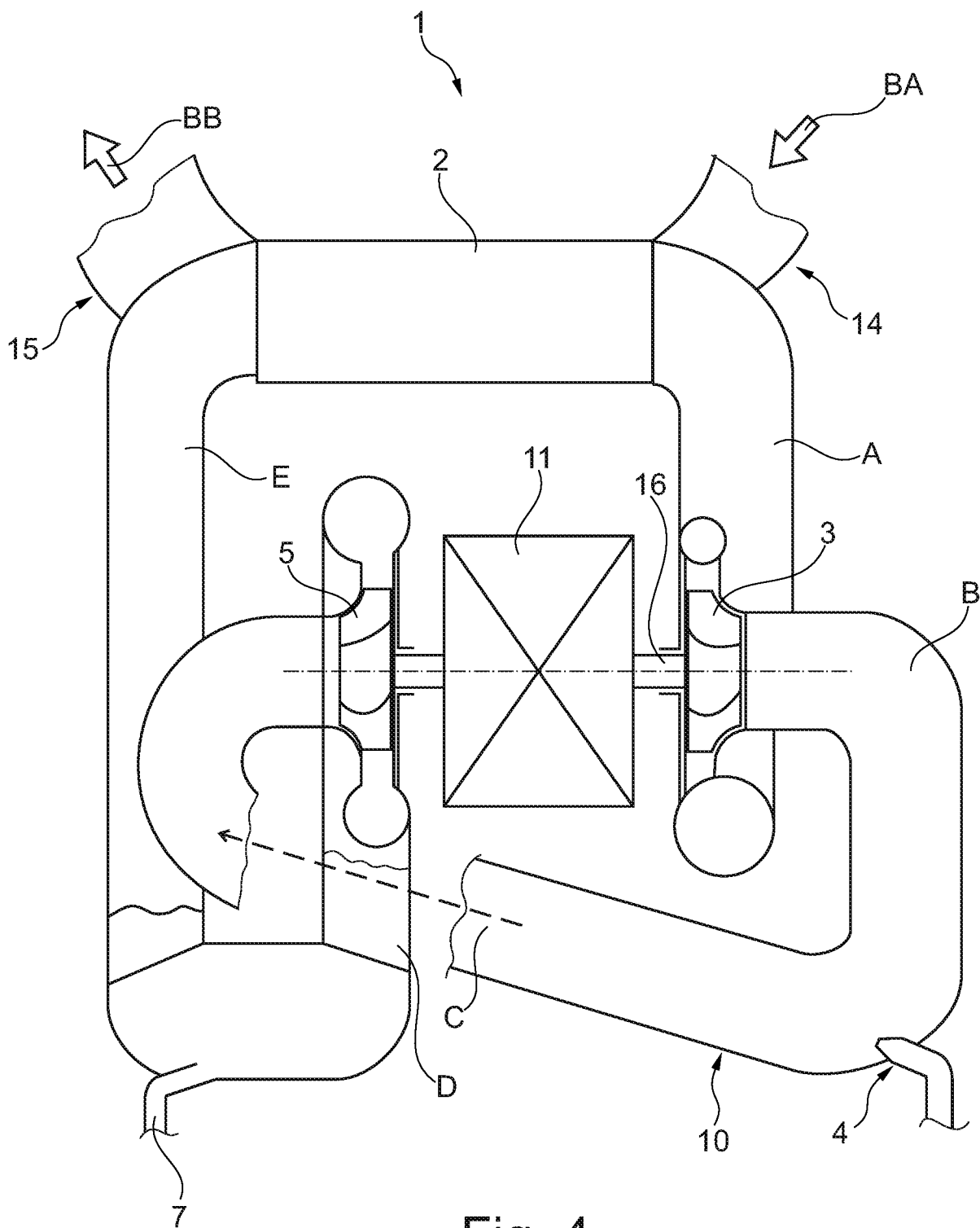


Fig. 4

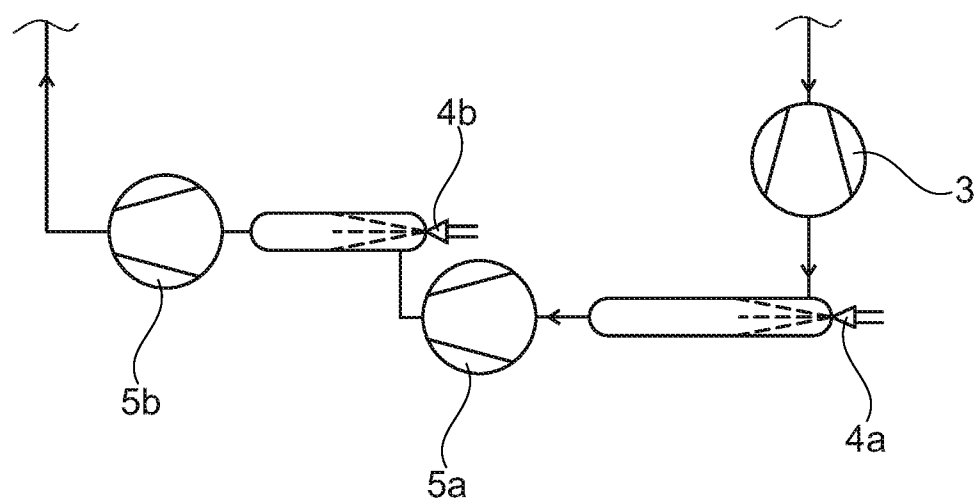
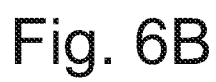
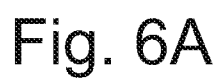


Fig. 5



Patentansprüche:

1. Verfahren zur Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Energie, mit den Schritten:
 - Erwärmen eines Prozessgases;
 - Expandieren des Prozessgases unter Abgabe von mechanischer Arbeit;
 - Einspritzen eines Verdunstungsfluids zu dem Prozessgas zur Verdunstungskühlung des Prozessgases;
 - Verdichten des Prozessgases;wobei das Prozessgas in einem geschlossenen Kreislauf geführt wird,
dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren weiter den Schritt aufweist:
 - Kondensationskühlen des verdichteten Prozessgases, wobei das Prozessgas gekühlt wird und das Verdunstungsfluid zumindest teilweise kondensiert und abgeschieden wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das durch das Kondensationskühlen des Prozessgases abgeschiedene Verdunstungsfluid rückgeführt wird zum Einspritzen zu dem Prozessgas.
3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, wobei das Prozessgas direkt mit Umgebungsluft und/oder Kühlluft gekühlt wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei das Prozessgas indirekt durch eine Kühlflüssigkeit gekühlt wird.
5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei die von der Kühlflüssigkeit abgeführte Wärme in einem Niedertemperaturwärmetauscher (13) abgegeben wird.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Einspritzung des Verdunstungsfluids bei einem Druck erfolgt, der unter dem Atmosphärendruck liegt.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei beim Expandieren des Prozessgases abgegebene mechanische Arbeit an einen Generator (11) abgegeben wird, sodass der Generator (11) angetrieben wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zum Erwärmen des Prozessgases in einem Wärmetauscher (2) Wärme von einem Arbeitsfluid auf das Prozessgas übertragen wird, insbesondere im Gegenstromprinzip.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei beim Einspritzen des Verdunstungsfluids das Verdunstungsfluid vernebelt wird.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Einspritzen eines Verdunstungsfluids über eine Sättigung des Prozessgases hinaus erfolgt.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Verdichten des Prozessgases zumindest teilweise als Nassverdichtung erfolgt, wobei das Verdunstungsfluid verdunstet.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Verdichten des Prozessgases angetrieben wird von beim Expandieren des Prozessgases abgegebener mechanischer Arbeit.
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Expandieren des Prozessgases, das Einspritzen des Verdunstungsfluids und das Verdichten des Prozessgases in einer Kammer (18) einer Kolbenmaschine (17) erfolgt.
14. Verfahren nach Anspruch 13, die Kolbenmaschine (17) mehrere Kammern (18) aufweist, wobei in jeder der mehreren Kammern (18) das Expandieren des Prozessgases, das Einspritzen eines Verdunstungsfluids und das Verdichten des Prozessgases erfolgt.
15. Verfahren nach Anspruch 14, wobei das Expandieren des Prozessgases, das Einspritzen eines Verdunstungsfluids und das Verdichten des Prozessgases in den mehreren Kammern (18) phasenversetzt erfolgt.
16. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei ein Vorrat an Prozessgas vorgesehen ist und wobei die Prozessgasmenge im geschlossenen Kreislauf durch Zufuhr von Prozessgas aus

dem Vorrat zum Ausgleich von Leckverlusten kontinuierlich oder diskontinuierlich konstant gehalten wird.

17. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Prozessgas ein Edelgas aufweist, insbesondere ein Edelgas ist.

18. Vorrichtung (1) zur Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Arbeit, aufweisend:

- einen Wärmetauscher (2) zum Erwärmen eines Prozessgas;
- eine Expansionsmaschine (3) zur Expansion des Prozessgases unter Abgabe von mechanischer Arbeit;

- eine Einspritzvorrichtung (4) zur Einspritzung eines Verdunstungsfluids zu dem Prozessgas zur Verdunstungskühlung des Prozessgases;

- einen Verdichter (5) zur Verdichtung des Prozessgases; wobei die Vorrichtung (1) zur Führung des Prozessgases in einem geschlossenen Kreislauf eingerichtet ist,

dadurch gekennzeichnet, dass

die Vorrichtung (1) einen Kondensationskühler (6) zur Abkühlung des vom Verdichter (5) verdichteten Prozessgases und zur Kondensation und Abscheidung des Verdunstungsfluids aus dem vom Verdichter (5) verdichteten Prozessgas aufweist.

19. Vorrichtung (1) nach Anspruch 18, aufweisend eine Rückführung (7) zum Rückführen von Verdunstungsfluid zur Einspritzvorrichtung (4).

20. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 oder 19, aufweisend ein Reservoir (8) zum Bereithalten von Verdunstungsfluid für die Einspritzvorrichtung (4).

21. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 bis 20, wobei die Einspritzvorrichtung (4) eine Pumpe (9) aufweist.

22. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 bis 21, wobei die Einspritzvorrichtung (4) mehrere Einspritzelemente (4a, 4b) zum Einspritzen des Verdunstungsfluid an mehreren Stellen aufweist.

23. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 bis 22, aufwei-

send eine Einspritzzone (10), wobei die Einspritzvorrichtung (4) in der Einspritzzone (10) vorgesehen ist, wobei die Einspritzzone (10) insbesondere von der Expansionsmaschine (3) und dem Verdichter (5) getrennt ist.

24. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 bis 23, wobei die Expansionsmaschine (3) eine Turbine, eine Verdrängungsmaschine oder eine Kolbenmaschine aufweist.

25. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 bis 24, wobei der Verdichter (5) eine Strömungsmaschine, eine Verdrängungsmaschine oder eine Kolbenmaschine aufweist.

26. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 bis 25, aufweisend eine Kolbenmaschine mit zumindest einer Kammer, wobei die zumindest eine Kammer jeweils die Expansionsmaschine (3) und den Verdichter (5) darstellt und die Einspritzvorrichtung (4) zur Einspritzung des Verdunstungsfluids in jeweils die zumindest eine Kammer eingerichtet ist.

27. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 bis 26, aufweisend einen Generator (11), der mit der Expansionsmaschine (3) verbunden ist.

28. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 18 bis 28, aufweisend einen Vorratsbehälter (12) zum Vorrätighalten von Prozessgas.