

(19)



(11)

EP 3 374 603 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
14.08.2019 Patentblatt 2019/33

(51) Int Cl.:
F01K 3/00 ^(2006.01) **F01K 3/06** ^(2006.01)
F01K 25/00 ^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **16805013.6**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2016/077319

(22) Anmeldetag: **10.11.2016**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2017/081186 (18.05.2017 Gazette 2017/20)

(54) **STROM-WÄRME-STROM-SPEICHERVORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUR LASTREGELUNG DERSELBEN**

POWER HEAT POWER STORAGE DEVICE AND METHOD FOR CONTROLLING THE LOAD OF THE SAME

DISPOSITIF DE STOCKAGE DE COURANT-CHALEUR-COURANT ET SON PROCÉDE DE COMPENSATION DE CHARGE

(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

(30) Priorität: **10.11.2015 EP 15193987**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
19.09.2018 Patentblatt 2018/38

(73) Patentinhaber:
• **Ortmann, Peter**
8200 Schaffhausen (CH)
• **Graf, Werner**
8200 Schaffhausen (CH)

(72) Erfinder:
• **Ortmann, Peter**
8200 Schaffhausen (CH)
• **Graf, Werner**
8200 Schaffhausen (CH)

(74) Vertreter: **Dr. Graf & Partner AG**
Intellectual Property
Herrenacker 15
Postfach 518
8201 Schaffhausen (CH)

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A1- 2 574 739 DE-A1-102011 088 380
DE-A1-102013 217 607

EP 3 374 603 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung zur Speicherung und Wiedergewinnung elektrischer Energie. Die Erfindung betrifft weiter ein Verfahren zur Lastregelung einer Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung.

Stand der Technik

[0002] Erneuerbare Energien wie Windenergie oder Solarenergie weisen die Nachteile auf, dass die verfügbare Leistung in Funktion der Zeit erheblichen Schwankungen unterliegt, und dass der Zeitpunkt der Energieerzeugung sowie die insgesamt erzeugte Energiemenge nicht oder nur ungenau vorherbestimmbar ist, weshalb eine Energieversorgung, welche ausschliesslich auf erneuerbaren Energien basiert, ein instabiles Verhalten aufweist, sodass Versorgungslücken und Überschüsse auftreten. Um eine stabile Versorgung mit elektrischer Energie zu gewährleisten ist es daher erforderlich die gewonnene elektrische Energie zu speichern und zeitversetzt, üblicherweise innerhalb von Stunden bis Tagen, wieder abzugeben. Zudem ist es zum stabilen Betrieb eines elektrischen Netzes erforderlich kurzfristige Energieschwankungen, wie diese zum Beispiel bei Solarzellen auftreten, wenn die Sonne während einer kurzen Zeitspanne von einer Wolke bedeckt wird, oder wenn ein grosser elektrischer Verbraucher ans Netz geschaltet wird, auszugleichen.

[0003] Es ist bekannt, elektrische Energie in sogenannten Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtungen, auch als SWS-Speichervorrichtung bezeichnet, zu speichern. Solche Vorrichtungen werden in Englisch auch als "Pumped Heat Electricity Storage Systems" oder abgekürzt als "PHES-Systems" bezeichnet. Bei einer SWS-Speichervorrichtung wird der elektrische Strom unter Verwendung eines Arbeitsgases und mit Hilfe einer Wärmepumpe in Wärme umgewandelt und die Wärme in einem Speicherbehälter gespeichert. Solche Speicherbehälter werden auch als Thermopotentialspeicher oder in Englisch als "Pumped Thermal Electricity Storage" bezeichnet. Bei Bedarf wird dem Speicherbehälter Wärme entnommen und mit einer Wärmekraftmaschine wieder in Strom umgewandelt. Die SWS-Speichervorrichtung erlaubt es somit, elektrischen Strom zu speichern und zeitversetzt wieder abzugeben. Das Dokument WO2013/164562 offenbart eine SWS-Speichervorrichtung, wobei diese SWS-Speichervorrichtung eine beschränkte Regelungsmöglichkeit aufweist. Zudem verursachen die tiefen Systemtemperaturen Probleme.

[0004] Das Dokument EP2147193B1 offenbart ebenfalls eine Vorrichtung sowie ein Verfahren zur Speicherung und Wiedergewinnung elektrischer Energie. Nachteilig an dieser Vorrichtung beziehungsweise an diesem Verfahren ist die Tatsache, dass die aufgenommene und abgegebene elektrische Leistung schwierig zu regeln ist.

[0005] Das Dokument EP2574739A1 offenbart ebenfalls eine Vorrichtung sowie ein Verfahren zur Speicherung und Wiedergewinnung elektrischer Energie. Diese Vorrichtung beziehungsweise dieses Verfahren weist den Nachteil auf, dass drei Speicher erforderlich sind, ein Wärmespeicher, ein Kältespeicher sowie ein Niedertemperatur-Wärmespeicher, was sehr aufwändig ist. Zudem kann die aufgenommene und abgegebene elektrische Leistung nicht geregelt werden, wobei insbesondere kein Teillastbetrieb möglich ist.

Darstellung der Erfindung

[0006] Aufgabe der Erfindung ist es eine Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung zur Speicherung und Wiedergewinnung elektrischer Energie zu bilden, welche eine vorteilhaftere Aufnahme und Abgabe von elektrischer Energie erlaubt, und welche insbesondere einen vorteilhaften Teillastbetrieb erlaubt.

[0007] Diese Aufgabe wird gelöst mit einer Vorrichtung aufweisend die Merkmale von Anspruch 1. Die abhängigen Ansprüche 2 bis 6 betreffen weitere vorteilhafte Ausgestaltungen.

[0008] Die Aufgabe wird weiter gelöst mit einem Verfahren aufweisend die Merkmale von Anspruch 7. Die abhängigen Ansprüche 8 bis 15 betreffen weitere vorteilhafte Verfahrensschritte.

[0009] Die Aufgabe wird insbesondere gelöst mit einer Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung umfassend einen Ladekreislauf sowie einen Endladekreislauf zum Fördern eines Arbeitsgases, wobei der Ladekreislauf sowie der Endladekreislauf einen gemeinsamen Regenerator umfassen, welcher umschaltbar entweder mit dem Ladekreislauf oder dem Endladekreislauf Fluid leitend verbunden ist, um einen geschlossenen Kreislauf auszubilden und um das Arbeitsgas dem Regenerator zuzuführen, wobei der Ladekreislauf einen ersten Turboverdichter sowie einen ersten Turboexpander umfasst, wobei der erste Turboverdichter vom ersten Turboexpander sowie einem Elektromotor angetrieben ist, wobei der Entladekreislauf einen zweiten Turboexpander und einen zweiten Turboverdichter umfasst, wobei der zweite Turboexpander den zweiten Turboverdichter sowie einen Generator antreibt, sowie umfassend eine Regelvorrichtung sowie eine Dichteänderungsvorrichtung, welche den Druck des Arbeitsgases im Ladekreislauf und/oder im Entladekreislauf ansteuerbar zu ändern erlauben, um die vom ersten Turboverdichter aufnehmbare Leistung beziehungsweise die vom zweiten Turboexpander abgebbare Leistung zu regeln.

[0010] Die Aufgabe wird weiter insbesondere gelöst mit einem Verfahren zur Lastregelung einer Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung umfassend einen Ladekreislauf mit einem ersten Turboverdichter, wobei dem ersten Turboverdichter

ter zum Erhitzen eines Arbeitsgases mechanische Leistung zugeführt wird, umfassend einen Entladekreislauf mit einem zweiten Turboexpander, wobei dem zweiten Turboexpander zum Abkühlen des Arbeitsgases mechanische Leistung entnommen wird, wobei der Ladekreislauf beziehungsweise der Entladekreislauf einen gemeinsamen Regenerator umfasst, welcher wahlweise mit dem Ladekreislauf oder dem Entladekreislauf zu einem geschlossenen Kreislauf verbunden wird, sodass entweder das im Ladekreislauf erhitze Arbeitsgas dem Regenerator zugeführt wird oder dem Regenerator heisses Arbeitsgas entnommen und dem Entladekreislauf zugeführt wird, wobei die vom ersten Turboverdichter aufgenommene mechanische Leistung und/oder die vom zweiten Turboexpander abgegebene mechanische Leistung durch ein Ändern des Drucks des Arbeitsgases geregelt wird.

[0011] Die erfindungsgemässe Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung umfasst zwei Kreisprozesse, einen Ladekreislauf sowie einen Entladekreislauf, und umfasst einen gemeinsamen Regenerator, wobei der Regenerator umschaltbar entweder mit dem Ladekreislauf oder dem Entladekreislauf verbunden ist, unter Ausbildung eines geschlossenen Kreislaufs. Im gesamten Ladekreislauf beziehungsweise im gesamten Entladekreislauf ist vorzugsweise ein einziger, gemeinsamer Regenerator angeordnet, das heisst, der Ladekreislauf bzw. der Entladekreislauf weist keine in Serie geschalteten Regeneratoren auf. Der einzige, gemeinsame Regenerator ist vorzugsweise als poröser Feststoffregenerator ausgestaltet. Der einzige, gemeinsame Regenerator kann vorteilhafterweise auch aus einer Mehrzahl parallel geschalteter Teilregeneratoren ausgebildet sein. In einer möglichst Ausgestaltung umfasst der gemeinsame Regenerator eine Mehrzahl von in Serie geschalteten Regeneratoren, sodass die Regeneratoren entlang des Ladekreislaufs bzw. des Entladekreislaufs angeordnet sind. Die erfindungsgemässe Vorrichtung umfasst zudem Turboverdichter und Turboexpander, das heisst rotierende Maschinen, zum Verdichten und Entspannen eines Arbeitsgases im Ladekreislauf beziehungsweise im Entladekreislauf. Ein Turboverdichter des Ladekreislaufs ist vorzugsweise von einem Elektromotor angetrieben. Ein Turboexpander des Entladekreislaufs treibt einen Elektrogenerator an. Die von der erfindungsgemässen Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung aufgenommene beziehungsweise abgegebene elektrische Leistung wird unter anderem dadurch geregelt, dass die Dichte beziehungsweise die totale Masse des sich im Ladekreislauf beziehungsweise im Entladekreislauf befindlichen Arbeitsgases verändert wird, was die vom Kreislaufprozess aufgenommene beziehungsweise abgegebenen Leistung verändert. Die erfindungsgemässe Vorrichtung kann somit einerseits mit Vollastbetrieb und andererseits mit Hilfe der Dichteregelung auch mit Teillast betrieben werden. In einer weiteren, vorteilhaften Ausgestaltung weist zumindest ein Turboverdichter oder ein Turboexpander des Ladekreislaufs und/oder des Entladekreislaufs verstellbare Vorleiträder auf, um durch eine Stellungsveränderung der Vorleiträder über eine zusätzliche Regelmöglichkeit zu verfügen die aufgenommene beziehungsweise abgegebene Leistung des Kreisprozesses zu regeln. In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung erfolgt die Regelung der aufgenommenen beziehungsweise abgegebenen elektrischen Leistung durch eine Kombination von Dichteregelung des Arbeitsgases und Stellungsveränderung der Vorleiträder. In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung erfolgt die Regelung der aufgenommenen beziehungsweise abgegebenen elektrischen Leistung durch eine Kombination von Dichteregelung des Arbeitsgases und Drehzahlregelung des Turboverdichters bzw. des Turboexpanders.

[0012] Die Dichteregelung umfasst eine Dichteänderungsvorrichtung, welche den Druck des Arbeitsgases im Ladekreislauf und/oder im Entladekreislauf ansteuerbar sowohl anheben als auch absenken kann, um über die Druckänderung des Arbeitsgases die Dichte des Arbeitsgases im Ladekreislauf und/oder im Entladekreislauf zu ändern, und um dadurch die von der erfindungsgemässen Vorrichtung aufgenommene bzw. abgegebene Leistung zu regeln.

[0013] Die erfindungsgemässe Vorrichtung beziehungsweise das erfindungsgemässe Verfahren weisen die Vorteile auf, dass ein einfacher, zuverlässiger und kostengünstiger Teillastbetrieb möglich ist, sowohl betreffend Aufnahme als auch Abgabe von elektrischer Leistung, und dass der Teillastbetrieb einen hohen Wirkungsgrad aufweist. Ein weiterer Vorteil ist darin zu sehen, dass eine rasche Anpassung beziehungsweise Änderung der aufgenommenen oder abgegebenen elektrischen Leistung möglich ist. Ein weiterer Vorteil ist darin zu sehen, dass ein rascher Wechsel von Energieabgabe zu Energieaufnahme und umgekehrt möglich ist. Die erfindungsgemässe Vorrichtung ist daher zum Betrieb in Kombination mit erneuerbaren Energiequellen besonders gut geeignet.

[0014] Die erfindungsgemässe Vorrichtung beziehungsweise das erfindungsgemässe Verfahren ist zudem besonders vorteilhaft zur Stabilisierung eines Elektrizitätsnetzes geeignet. Elektrizitätsnetze mit einem hohen Anteil an Wind- und Solarenergie weisen eine hohe Residuallast auf, das heisst eine Last bzw. Leistung, die von schnell regelbaren Kraftwerken aufzubringen ist. Es ist bekannt, für eine stark fluktuierende Einspeisung von Windkraft- und Solaranlagen Pumpspeicherkraftwerke zu verwenden, weil diese Energieüberschüsse speichern und wieder abgeben können. Pumpspeicherkraftwerke sind jedoch üblicherweise als drehzahlstarre Systeme ausgebildet und weisen zudem im Teillastbetrieb einen erheblich reduzierten Wirkungsgrad auf. Solche Pumpspeicherkraftwerke eignen sich daher schlecht zum Betrieb mit variabler elektrischer Leistung.

[0015] Die erfindungsgemässe Vorrichtung beziehungsweise das erfindungsgemässe Verfahren verwendet Turboverdichter beziehungsweise Turboexpander, das heisst rotierende Maschinen, zum Verdichten und Entspannen des Arbeitsgases, und weisen in Kombination mit einem Elektrizitätsnetz die Vorteile auf, dass einer raschen Änderung der Residuallast problemlos gefolgt werden kann, dass ein Teillastbetrieb mit hohem Wirkungsgrad möglich ist, dass in einer möglichen Ausgestaltung auch ein Betrieb mit variabler Drehzahl möglich ist, und dass die erfindungsgemässe

Vorrichtung daher ausgezeichnet zur Stabilisierung des Elektrizitätsnetzes geeignet ist. Die erfindungsgemässe Vorrichtung beziehungsweise das erfindungsgemässe Verfahren ist daher in der Lage die beiden für einen stabilen Betrieb eines Elektrizitätsnetzes erforderlichen Systemdienstleistungen Beschaffung von Regelleistung sowie Einsatz von Regelleistung bereitzustellen, und ist bezüglich dieser Systemdienstleistungen herkömmlichen Pumpspeicherkraftwerken überlegen. Die erfindungsgemässe Vorrichtung ist im Rahmen ihrer verfügbaren Speicherkapazität in der Lage in einem Elektrizitätsnetz die Differenz zwischen erzeugter und verbrauchter elektrischer Leistung ständig auszugleichen, und kann somit die Stabilität eines Elektrizitätsnetzes gewährleisten. Die erfindungsgemässe Vorrichtung ist einerseits in Kombination mit insbesondere erneuerbaren Energien betreibbar, um elektrische Energie zu speichern und zeitversetzt wieder abzugeben. Die erfindungsgemässe Vorrichtung ist jedoch auch zur Netzstabilisierung geeignet, in Kombination mit erneuerbaren Energien oder auch in herkömmlichen Elektrizitätsnetzen. Ein besonderer Vorteil der erfindungsgemässen Vorrichtung ist die Tatsache, dass das Zurverfügungstellen von Regelleistung bei der Netzstabilisierung die grössten Kosten verursacht, und dass die erfindungsgemässe Vorrichtung eine solche Regelleistung erzeugen kann. Gegenüber Pumpspeicherkraftwerken weist die erfindungsgemässe Vorrichtung die Vorteile auf, dass diese kostengünstiger erstellbar ist, dass diese auch im Flachland erstellbar ist, dass ein geringerer Platzbedarf erforderlich ist, und dass diese bezüglich Landschaftsbild eine wesentlich geringere Beeinträchtigung verursachen und daher bei der Bevölkerung auf weniger Widerstand stossen.

[0016] Die erfindungsgemässe Vorrichtung verfügt auf Grund der rotierenden Schwungmassen von Motor, Generator und Turbomaschinen über eine Momentanreserve und ist daher in der Lage die Frequenz eines Elektrizitätsnetzes äusserst kurzfristig zu stabilisieren. Die erfindungsgemässe Vorrichtung ist zudem in der Lage durch eine Dichteänderung des Arbeitsgases und/oder eine Stellungsänderung der Vorleiträder von Turboverdichter und/oder Turboexpander und/oder einer Drehzahländerung von Turboverdichter und/oder Turboexpander kurzfristig Regelleistung beziehungsweise elektrische Energie aufzunehmen oder abzugeben, und kann daher eine positive oder negative Primärregelleistung, welche in Elektrizitätsnetzen üblicherweise innerhalb 30 Sekunden zur Verfügung zu stellen ist, oder auch eine Sekundärregelleistung, welche üblicherweise innerhalb von 5 Minuten zur Verfügung zu stellen ist, oder auch eine Minutenreserve, welche üblicherweise innerhalb von 15 Minuten zur Verfügung zu stellen ist, abgeben oder aufnehmen.

[0017] Die erfindungsgemässe Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung, die auch als eine thermische Batterie bezeichnet werden könnte, kann insofern ähnlich einer Elektrobatterie geladen und entladen werden, als nebst einer Vollladung jederzeit auch ein Teilladen oder ein Teilentladen möglich ist. Das der erfindungsgemässen Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung zu Grunde liegende Speicherkonzept erlaubt es durch eine entsprechende Auslegung der Teilkomponenten vorzugsweise elektrische Leistungen im Bereich zwischen 1 bis 50 MW und vorzugsweise elektrische Energiemengen im Bereich zwischen 1 bis 250 MWh zu speichern und zeitverzögert wieder abzugeben. Auf Grund der relativ grossen speicherbaren elektrischen Energie bzw. Energiemenge ist die erfindungsgemässe Speichervorrichtung zur Netzstabilisierung einer Energieversorgung umfassend erneuerbare Energiequellen besonders gut geeignet.

[0018] Die erfindungsgemässe Speichervorrichtung umfasst einen Regenerator. Ein Regenerator ist ein Wärmetauscher, bei dem die Wärme während des Austauschvorgangs in einem Speichermaterial zwischengespeichert wird. Beim Laden des Regenerators wird die vom heissen Arbeitsgas zugeführte Wärmeenergie an das Speichermaterial abgegeben und im Speichermaterial gespeichert. Beim Entladen des Regenerators wird dem Speichermaterial kühles Arbeitsgas zugeführt, wobei das kühle Arbeitsgas dem Speichermaterial Wärmeenergie entzieht, sodass das Speichermaterial abgekühlt und das Arbeitsgas erwärmt wird, wobei die dem Arbeitsgas entzogene Wärmeenergie einem nachfolgenden Prozess zugeführt wird. In einer möglichen Ausgestaltung weist der Regenerator Rohre auf, durch welche das Arbeitsfluid strömt, wobei die Rohre thermisch leitend mit dem Speichermaterial gekoppelt sind, damit ein Wärmeaustausch auftritt. In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung weist der Regenerator einen mit Speichermaterial gefüllten, gasdurchlässigen Innenraum auf, wobei das Arbeitsgas direkt mit dem Speichermaterial in Kontakt kommt und dieses umströmt. Ein derartiger, gasdurchlässiger Regenerator weist den Vorteil auf, dass die Wärmeübertragungsfläche besonders gross ist, da das Speichermaterial direkt vom Arbeitsgas umströmt wird, sodass die Wärme besonders schnell an das Speichermaterial übertragen werden kann oder diesem entzogen werden kann, da das Arbeitsgas sowohl beim Laden als auch beim Entladen in direkten Kontakt mit dem Speichermaterial tritt.

[0019] Die Erfindung wird nachfolgend an Hand von mehreren Ausführungsbeispielen im Detail beschrieben.

Kurze Beschreibung der Figuren

[0020] Die zur Erläuterung der Ausführungsbeispiele verwendeten Zeichnungen zeigen:

- Fig. 1 eine Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung;
- Fig. 2 einen Ladekreislauf im Detail;
- Fig. 3 einen Entladekreislauf im Detail;
- Fig. 4 ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung;
- Fig. 5 einen Ladekreislauf mit vier Teilregeneratoren;

- Fig. 6 einen Ladekreislauf mit zwei Teilregeneratoren;
 Fig. 7 ein Entladekreislauf mit zwei Teilregeneratoren;
 Fig. 8 ein T,s-Diagramm, welches den Einfluss der Dichteänderung dargestellt;
 Fig. 9 ein Leistungs-Wirkungsgrad-Diagramm in Abhängigkeit der Anzahl Teilregeneratoren;
 5 Fig. 10 - 12 je ein Diagramm betreffend Aufnahme und Abgabe elektrischer Leistung in Funktion der Zeit bei unterschiedlichen Betriebsverfahren;
 Fig. 13 ein Detail des Regelverfahrens bei einer Änderung der abgegebenen Leistung.

[0021] Grundsätzlich sind in den Zeichnungen gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen.

Wege zur Ausführung der Erfindung

[0022] Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele offenbart, welche sich unter anderem die Dichteregelung zu Nutze machen.

15 [0023] Die Leistung einer Turbomaschine ist abhängig vom thermodynamischen Zustand der Maschine, charakterisiert durch die Enthalpiedifferenz $\Delta h(T,p)$ und vom Massendurchsatz m der Maschine. So beträgt beispielsweise die Leistung P eines Turboexpanders bzw. einer Turbine

$$P = m \Delta h(T,p) \quad (1)$$

wobei:

25 m : Massenstrom [kg/s]
 Δh : Enthalpiedifferenz [J/kg]
 T : Temperatur [K]
 p : Druck [Pa]

[0024] Der Massenstrom lässt sich berechnen zu

$$m = \rho V \quad (2)$$

wobei:

35 ρ : Dichte [kg/m³]
 V : Volumenstrom [m³/s]

[0025] Für die Dichte gilt:

$$\rho = p/(RT) \quad (3)$$

wobei:

45 R : Gaskonstante [J/kgK]

[0026] Fasst man die drei genannten Gleichungen (1) bis (3) zusammen, so ergeben sich die nachfolgenden Gleichungen (4a, 4b):

$$P = \rho V \Delta h(T,p) \quad (4a)$$

$$P = p/(RT) V \Delta h(T,p) \quad (4b)$$

[0027] Gemäss Gleichung (4a) gilt, dass die Leistung P des Turboexpanders proportional zur Dichte des geförderten

Arbeitsgases ist. Gemäss Gleichung (4b) gilt, dass die Leistung P des Turboexpanders proportional zum Druck p des geförderten Arbeitsgases ist. Wird die Dichte des Arbeitsgases beziehungsweise der Druck p des Arbeitsgases beispielsweise verdoppelt, so verdoppelt sich die resultierende Leistung P . Wird die Dichte des Arbeitsgases beziehungsweise der Druck p des Arbeitsgases beispielsweise halbiert, so halbiert sich die resultierende Leistung P .

[0028] Die Leistungsaufnahme eines Turboverdichters beziehungsweise die Leistungsabgabe eines Turboexpanders kann somit durch eine Änderung der Dichte beziehungsweise des Drucks des Arbeitsgases geregelt werden. Voraussetzung ist, dass bei einer Dichte- bzw. Druckänderung sowohl der Eintrittsdruck als auch der Austrittsdruck der Turbomaschine angehoben beziehungsweise abgesenkt wird. Dies ist bei einem geschlossenen Kreislauf der Fall. Die erfindungsgemässe Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung weist zwei geschlossene Kreisläufe auf, den Ladekreislauf sowie den Entladekreislauf, und nutzt die Dichteänderung bzw. die Druckänderung des Arbeitsgases zur Regelung der aufgenommenen beziehungsweise der abgegebenen Leistung.

[0029] Wie aus den Gleichungen 4a und 4b ersichtlich könnte die Leistungsaufnahme des Turboverdichters beziehungsweise die Leistungsabgabe des Turboexpanders auch durch eine Volumenstromänderung erzielt werden. Eine Regelung basierend auf einer Veränderung des Volumenstroms weist jedoch den Nachteil auf, dass der Wirkungsgrad der Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung in der Teillast beziehungsweise im Teillastbetrieb stark abfällt, sodass eine Regelung der Dichte des Arbeitsgases wesentlich vorteilhafter ist.

[0030] Das Betriebsverhalten des Turboverdichters beziehungsweise des Turboexpanders in der erfindungsgemässen Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung wird an Hand eines T,s-Diagrammes näher erläutert. Figur 8 zeigt das T,s-Diagramm des in Figur 3 dargestellten geschlossenen Entladekreislaufs 200.

[0031] Figur 3 zeigt den in Figur 1 dargestellten geschlossenen Entladekreislauf 200, welcher als Gasturbinenprozess ausgestaltet ist, im Detail. Der geschlossene Entladekreislauf 200 für das Arbeitsgas A umfasst einen zweiten Turboverdichter 210, einen zweiten Turboexpander 250, einen zweiten Rekuperator 230 mit einem ersten und einem zweiten Wärmetauschkanal 230a, 230b, einen Hochtemperaturregenerator 120 sowie einen ersten Kühler 270, wobei der zweite Turboverdichter 210 über die Welle 214 mit dem zweiten Turboexpander 250 und einem Generator 290 gekoppelt ist. Im Entladekreislauf 200 ist eine Dichteänderungsvorrichtung 300 angeordnet, welche es erlaubt die Dichte beziehungsweise den Systemdruck des Arbeitsgases A beziehungsweise das obere und das untere Druckniveau des Arbeitsgases A zu verändern. Der Entladekreislauf 200 weist einen einzigen Regenerator auf, den Hochtemperaturregenerator 120. Figur 8 zeigt mit Y_1 den Kreisprozess beziehungsweise das T,s-Diagramm, bzw. das Temperatur-Entropie-Diagramm des geschlossenen Entladekreislaufs 200 bei einem Arbeitsgas A mit einer ersten Dichte, einer tiefen Dichte beziehungsweise einem tiefen Druck. Ausgehend vom Arbeitspunkt Y_{1A} , aufweisend das untere Druckniveau, wird das Arbeitsgas A durch den zweiten Turboverdichter 210 bis zum Arbeitspunkt Y_{1B} , aufweisend das obere Druckniveau, verdichtet, im vorliegenden Beispiel von 2 bar auf 8 bar. Bei Stillstand der Speichervorrichtung 1 erfolgt ein Druckausgleich zwischen dem unteren Druckniveau und dem oberen Druckniveau, sodass sich ein Stillstanddruck, auch als "Settle out Druck" bezeichnet, einstellt, der zwischen dem unteren und dem oberen Druckniveau liegt. Beim Betrieb der Speichervorrichtung 1 stellt sich auf Grund der Verdichter und Expander das untere und obere Druckniveau ein. Das Arbeitsgas A wird nach dem Arbeitspunkt Y_{1B} bis zum Arbeitspunkt Y_{1C} erwärmt, insbesondere durch den Hochtemperaturregenerator 120, daraufhin im zweiten Turboexpander 250 bis zum Arbeitspunkt Y_{1D} entspannt, und danach bis zum Arbeitspunkt Y_{1A} abgekühlt. Die Dichte beziehungsweise der Systemdruck des Arbeitsgases A wird nun angehoben, auf eine zweite Dichte, einer höheren Dichte, beziehungsweise einen zweiten Systemdruck, was zur Folge hat, dass der Kreisprozess nach links verschoben wird. Figur 8 zeigt mit Y_2 diesen nach links verschobenen Kreisprozess, beziehungsweise das T,s-Diagramm des geschlossenen Entladekreislaufs 200 bei einem Arbeitsgas A aufweisend die zweite Dichte. Ausgehend vom Arbeitspunkt Y_{2A} wird das Arbeitsgas A vom zweiten Turboverdichter 210 bis zum Arbeitspunkt Y_{2B} verdichtet, im vorliegenden Beispiel von 5 bar auf 20 bar. Das Arbeitsgas A wird danach bis zum Arbeitspunkt Y_{2C} erwärmt, daraufhin im zweiten Turboexpander 250 bis zum Arbeitspunkt Y_{2D} entspannt, und danach bis zum Arbeitspunkt Y_{2A} abgekühlt. Die in Figur 8 durchgezogenen Linien stellen Isobaren dar. Der Abkühlungsvorgang des Arbeitsgases A erfolgt somit in beiden Kreisprozessen Y_1 , Y_2 nahezu entlang einer Isobaren.

[0032] Das Betriebsverhalten des Turboexpanders bzw. des Turboverdichters ist abhängig vom Eintrittsvolumenstrom, von dessen Drehzahl und der Stellung des Vorleitrades oder Vorleiträder. Wird der Turboexpander im Entladekreislauf 200 mit konstanter Drehzahl betrieben, dann verändert sich der Volumenstrom nicht. Die Dichteänderung hat jedoch gemäss Gleichung (1) zur Folge, dass die vom Turboexpander abgegebene Leistung erhöht beziehungsweise reduziert wird. Eine derartige Dichteregulierung weist zudem den Vorteil auf, dass der Wirkungsgrad der Maschine vorzugsweise unverändert ist, und dass die Ecktemperaturen der Kreisprozesse Y_1 , Y_2 und damit der Prozesswirkungsgrad unverändert oder im Wesentlichen unverändert bleibt, wie dies in Figur 8 aus dem dargestellten T,s-Diagramm ersichtlich ist. Die erfindungsgemässe Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung weist somit den Vorteil auf, dass die vom Entladekreislauf 200 abgegebene Leistung, beziehungsweise auf analoge Weise die vom Ladekreislauf 100 aufgenommene Leistung über eine Dichteregulierung gesteuert werden kann, und dass der Wirkungsgrad des Entladekreislaufs beziehungsweise des Ladekreislaufs bei Vollastbetrieb wie auch bei Teillastbetrieb konstant beziehungsweise nahezu konstant bleibt. Somit kann die abgegebene und aufgenommene mechanische Leistung der erfindungsgemässen Speichervorrichtung

1, und falls ein Generator und ein Motor mit der Speichervorrichtung 1 gekoppelt ist, die abgegebene und aufgenommene elektrische Leistung von Motor und Generator durch die Druckregelung bzw. die Dichteregelung des Arbeitsgases A gesteuert werden. Insbesondere der Einfluss der Reynolds-Zahl wirkt sich in eingeschränktem Masse auf den Wirkungsgrad der Turbomaschinen aus. Auch hat die Reynolds-Zahl einen Einfluss auf den Wärmeübergang der kalorischen Apparate im Kreisprozess. Mit steigender Dichte bzw. steigendem Druck wird der Wärmeübergang verbessert, mit sinkender Dichte und Druck wird der Wärmeübergang reduziert. Die vorhin beschriebene Dichteregelung hat zur Folge, dass der geschlossene Ladekreislauf der erfindungsgemässen Speichervorrichtung, insbesondere der Wärmepumpenprozess des geschlossenen Ladekreislaufs, sowohl bei Vollast als auch bei Teillast einen nahezu konstanten Wirkungsgrad aufweist. Ebenso weist der geschlossene Endladekreislauf der erfindungsgemässen Speichervorrichtung, insbesondere der Gasturbinenprozess des geschlossenen Endladekreislaufs, einen nahezu konstanten Wirkungsgrad auf. Der Wirkungsgrad der Speichervorrichtung bleibt somit auch bei einem Teillastbetrieb konstant beziehungsweise nahezu konstant.

[0033] Fig. 1 zeigt eine Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung 1 zur Speicherung und Wiedergewinnung elektrischer Energie, nachfolgend auch als Energiespeichervorrichtung 1 bezeichnet. Die Energiespeichervorrichtung 1 umfasst einen Ladekreislauf 100 mit Leitungen 101, einen Entladekreislauf 200 mit Leitungen 201, einen Hochtemperaturregenerator 120, nachfolgend auch als Regenerator bezeichnet, zwei Dichteänderungsvorrichtungen 300 sowie Schaltmittel 400, 401, wobei die Schaltmittel 400, 401 derart mit den Leitungen 101, 201 verbunden sind, dass der Hochtemperaturregenerator 120 Fluid leitend und umschaltbar entweder mit dem Ladekreislauf 100 oder mit dem Entladekreislauf 200 zu einem geschlossenen Kreislauf verbunden werden kann, sodass der Ladekreislauf 100 und der Entladekreislauf 200 den Hochtemperaturregenerator 120 nacheinander im Gegenstrom durchströmen. Eine Regelungsvorrichtung 500 ist signalleitend mit den Schaltmitteln 400, 401 und weiteren, nicht im Detail dargestellten Sensoren und Aktuatoren verbunden, um die Energiespeichervorrichtung 1 anzusteuern und Zustandsgrößen wie Druck, Drehzahl, Temperatur, aufgenommene Leistung, abgegebene Leistung usw. zu messen. Die Figuren 2 und 3 zeigen den in Figur 1 dargestellten Ladekreis 100 bzw. Entladekreis 200 umfassend die Dichteänderungsvorrichtung 300 im Detail.

[0034] Der Hochtemperaturregenerator wird von einem im geschlossenen Kreislauf zirkulierenden Arbeitsgas durchströmt, wobei der Ladekreislauf dem Hochtemperaturregenerator Wärme zuführt, und wobei der Entladekreislauf dem Hochtemperaturregenerator Wärme entzieht. Im Ladekreislauf liegt die Temperatur des in den Hochtemperaturregenerator einströmenden Arbeitsgases vorzugsweise im Bereich zwischen 600 bis 1000 °C, und die Temperatur des aus dem Hochtemperaturregenerator ausströmenden Arbeitsgases grundsätzlich tiefer, und vorzugsweise im Bereich zwischen 400 °C bis 700 °C. Das Arbeitsgas soll dabei vorzugsweise möglichst ungehindert durch den Hochtemperaturregenerator strömen und dabei die Wärme abgeben beziehungsweise aufnehmen. Der Hochtemperaturregenerator sollte vorzugsweise die nachfolgenden, teilweise widersprüchlichen Anforderungen erfüllen:

- Die Wärmekapazität sollte möglichst gross sein, das heisst ein Regenerator aus einem dicht gepacktem Material hoher Wärmekapazität.
- Der Druckverlust sollte möglichst klein sein. Dies könnte mit einem Regenerator mit geringer Durchströmgeschwindigkeit.
- Die mit dem durchströmenden Arbeitsgas in Berührung kommende Fläche sollte möglichst groß sein bzw. die Durchströmgeschwindigkeit hoch, damit ein guter Wärmeübergang erreicht wird.
- Der Regenerator sollte langlebig sein.

Der Hochtemperaturregenerator 120 enthält ein festes Speichermaterial sowie ein Arbeitsgas A als Wärmeträger, um zwischen dem Speichermaterial und dem durchströmenden Arbeitsgas A Wärme auszutauschen. Als festes Speichermaterial für den Hochtemperaturregenerator 120 sind beispielsweise poröse feuerfeste Materialien, Sand, Kies, Gestein, Beton, Graphit oder auch eine Keramik wie Siliziumkarbid geeignet. Der Hochtemperaturregenerator 120 umfasst eine Aussenhülle 120a sowie einen Innenraum, wobei im Innenraum das feste Speichermaterial derart angeordnet und/oder ausgestaltet ist, dass das Speichermaterial zum Wärmeaustausch vom Arbeitsgas A durchströmt oder umströmt werden kann. Das Speichermaterial wird sowohl im Ladekreislauf als auch im Entladekreislauf vorzugsweise direkt vom Arbeitsgas umströmt und gelangt somit in direkten Kontakt mit dem Arbeitsgas. Vorteilhafterweise ist etwa 40% bis 70% des Innenraums mit Speichermaterial gefüllt, beziehungsweise sind 30% bis 60% des Speichervolumens mit Arbeitsgas A gefüllt. Der Hochtemperaturregenerator 120 umfasst, wie aus Figur 2 ersichtlich, zudem zumindest eine Eintrittsöffnung 120b sowie zumindest eine Austrittsöffnung 120c um das in den Leitungen 101 bzw. 201 strömende Arbeitsgas A dem Innenraum des Hochtemperaturregenerators zu- bzw. abzuführen, sodass das im Ladekreislauf 100 oder im Entladekreislauf 200 zirkulierende Arbeitsgas A in Kontakt, vorzugsweise in direkten Kontakt mit dem festen Speichermaterial gelangt. Die Figuren 1 bis 3 zeigt einen in vertikaler Richtung verlaufenden bzw. angeordneten Hochtemperaturregenerator 120, wobei das Arbeitsgas A beim Laden von oben nach unten strömt und beim Entladen von unten nach oben strömt.

[0035] Figur 2 zeigt den in Figur 1 dargestellten geschlossenen Ladekreislauf 100 im Detail. Der geschlossene Lade-

kreislauf 100 für das Arbeitsgas A umfasst einen ersten Turboverdichter 110, einen ersten Turboexpander 140, einen ersten Rekuperator 130 mit einem ersten und einem zweiten Wärmetauschkana 130a, 130b, den Hochtemperaturregenerator 120 sowie einen Vorwärmer 151, wobei der erste Turboverdichter 110 über eine gemeinsame Welle 114 mit dem ersten Turboexpander 140 und einem Elektromotor 170 gekoppelt ist. Der erste Turboverdichter 110 sowie der
 5 ersten Turboexpander 140 bilden die Grundelemente einer Wärmepumpe 2. Die als Ventile ausgestalteten Schaltmittel 400 sind auf Durchfluss geschaltet und die in Figur 2 nicht dargestellten Schaltmittel 401 sind gesperrt, sodass sich ein geschlossener Ladekreislauf 100 ausbildet, in welchem das Arbeitsgas A in Strömungsrichtung A1 bzw. in Ladeströmungsrichtung A1 strömt. Als Arbeitsgas A wird vorzugsweise Argon oder Stickstoff verwendet. Ausgehend vom Hochtemperaturregenerator 120 wird das Arbeitsgas A nacheinander folgend zumindest dem ersten Wärmetauschkana 130a
 10 des Rekuperators 130, dem ersten Turboexpander 140, dem Vorwärmer 151, dem zweiten Wärmetauschkana 130b des Rekuperators 130, dem ersten Turboverdichter 110 und danach wiederum dem Hochtemperatur-Regenerator 120 zugeführt, unter Ausbildung eines geschlossenen, Fluid leitenden Ladekreislaufs 100. Der Ladekreislauf 100 umfasst einen Hochdruckabschnitt 100a sowie einen Niederdruckabschnitt 100b, wobei der Hochdruckabschnitt 100a in Strömungsrichtung A1 zwischen dem ersten Turboverdichter 110 und dem ersten Turboexpander 140 verläuft, und wobei
 15 der Niederdruckabschnitt 100b in Strömungsrichtung A1 zwischen dem ersten Turboexpander 140 und dem ersten Turboverdichter 110 verläuft. Eine Dichteänderungsvorrichtung 300 umfasst einen Druckbehälter 301, der über eine Leitung 305 und ein Ventil 302 mit dem Niederdruckabschnitt 100b verbunden ist, und der über eine Leitung 306, einen Verdichter 304 und ein Ventil 303 mit dem Hochdruckabschnitt 100a verbunden ist. Mit Hilfe der Dichteänderungsvorrichtung 300 kann dem Ladekreislauf 100 ansteuerbar Arbeitsgas A entnommen werden oder kann Arbeitsgas A zugeführt werden, sodass die Dichte des Arbeitsgases A und somit die Leistungsaufnahme des ersten Turboverdichters 110 beeinflusst werden kann, sodass der Ladekreislauf 100 durch eine Dichteänderung ansteuerbar mit Vollast oder einer einstellbaren Teillast betrieben werden kann. Das Arbeitsgas A wird vorteilhafterweise unter erhöhtem Druck gehalten, um die Leistungsdichte des Verdichters 110 und der Turbine 140 zu erhöhen und den Wärmeübergang in den kalorischen Apparaten wie dem Rekuperator 130 oder dem Vorwärmer 151 zu verbessern. Der Druck des Arbeitsgases A wird
 25 vorzugsweise in einem Bereich von 1 bis 20 bar gehalten beziehungsweise geregelt.

[0036] In einer weiteren möglichen Ausführungsform könnte die Dichteänderungsvorrichtung 300 auch derart ausgestaltet sein, dass das Arbeitsgas A des Ladekreislaufs 100 zur Dichtereduktion an die Umgebung entlassen wird, und dass das Arbeitsgas A zur Dichteerhöhung zum Beispiel aus einem Druck beaufschlagten Speicher wieder in den Ladekreislauf 100 eingeführt wird. Ein solches Vorgehen wäre zum Beispiel mit einem unkritischen Arbeitsgas A wie
 30 Stickstoff möglich. Da die erfindungsgemässe Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung vorzugsweise während mehreren tausend Stunden pro Jahr betrieben werden soll ist es jedoch vorteilhafter, wenn das Arbeitsgas A in einem Speicherbehälter 301 zwischengespeichert wird, insbesondere auch dann, wenn als Arbeitsgas A ein relativ teures Gas wie beispielsweise Argon verwendet wird. Um den Speicherbehälter 301 nicht unverhältnismässig gross werden zu lassen ist es vorteilhaft, das Arbeitsgas A mittels eines Verdichters 304 in den Speicherbehälter 301 zu pumpen. Der Verdichter 304 ist vorteilhafterweise mit dem Hochdruckteilabschnitt 100a verbunden. Das Arbeitsgas A wird vorteilhafterweise über den Niederdruckabschnitt 100b wieder dem Ladekreislauf 100 zugeführt.
 35

[0037] Der erste Turboverdichter 110, der erste Turboexpander 140, der erste Rekuperator 130 sowie der Vorwärmer 151 bilden eine Wärmepumpe 2. Das vom Vorwärmer 151 und dem Rekuperator 130 vorgewärmte Arbeitsgas A wird als Eingangsgas dem ersten Turboverdichter 110 zugeführt, darin verdichtet, und erfährt dadurch eine Temperatur- und Druckerhöhung. Das verdichtete Arbeitsgas A wird dem Hochtemperaturregenerator 120 zugeführt, darin abgekühlt, nachfolgend im Rekuperator 130 weiter abgekühlt, und anschliessend im ersten Turboexpander 140 entspannt, um anschliessend im Vorwärmer 151 und im Rekuperator 130 wieder vorgewärmt zu werden. Der erste Turboexpander 140 und der Turboverdichter 110 sind auf derselben Welle 114 angeordnet, sodass der erste Turboexpander 140 das Antreiben des ersten Turboverdichters 110 unterstützt. Die Welle 114 wird vom Elektromotor 170 angetrieben, wobei
 40 an Stelle des Elektromotors 170 auch eine andere Antriebsvorrichtung geeignet ist, beispielsweise eine Turbine, oder allgemein eine Kraftmaschine.

[0038] Um die im Hochtemperaturregenerator 120 gespeicherte Wärmeenergie wieder zu entladen ist ein Entladekreislauf 200 erforderlich. Figur 3 zeigt den in Figur 1 dargestellten geschlossenen Entladekreislauf 200, welcher als Gasturbinenprozess ausgestaltet ist, im Detail. Als Arbeitsgas A wird dasselbe Gas wie im Ladekreislauf 100 verwendet, vorzugsweise Argon oder Stickstoff. Der geschlossene Entladekreislauf 200 für das Arbeitsgas A umfasst einen zweiten Turboverdichter 210, einen zweiten Turboexpander 250, einen zweiten Rekuperator 230 mit einem ersten und einem zweiten Wärmetauschkana 230a, 230b, den Hochtemperaturregenerator 120 sowie einen ersten Kühler 270, wobei der zweite Turboverdichter 210 über die Welle 214 mit dem zweiten Turboexpander 250 und einem Generator 290 gekoppelt ist. Die als Ventile ausgestalteten Schaltmittel 401 sind auf Durchfluss geschaltet und die in Figur 3 nicht
 50 dargestellten Schaltmittel 400 sind gesperrt, sodass sich ein geschlossener Entladekreislauf 200 ausbildet, in welchem das Arbeitsgas A in Strömungsrichtung A2 bzw. in Entladeströmungsrichtung A2 strömt. Der Entladekreislauf 200 ist derart ausgebildet, dass ausgehend vom Hochtemperaturregenerator 120 nacheinander folgend zumindest der zweite Turboexpander 250, der erste Wärmetauschkana 230a des zweiten Rekuperators 230, der erste Kühler 270, der zweite
 55

Turboverdichter 210, der zweite Wärmetauschkanal 230b des Rekuperators 230, und danach der Hochtemperatur-Regenerator 120 unter Ausbildung des geschlossenen Kreislafs Fluid leitend miteinander verbunden sind, wobei das Arbeitsgas A im Entladekreislauf 200 in Strömungsrichtung A2 bzw. in Entladeströmungsrichtung A2 strömt. Der Entladekreislauf 200 umfasst einen Hochdruckabschnitt 200a sowie einen Niederdruckabschnitt 200b, wobei der Hochdruckabschnitt 200a in Strömungsrichtung A2 zwischen dem zweiten Turboverdichter 210 und dem zweiten Turboexpander 250 verläuft, und wobei der Niederdruckabschnitt 200b in Strömungsrichtung A2 zwischen dem zweiten Turboexpander 250 und dem zweiten Turboverdichter 210 verläuft. Eine Dichteänderungsvorrichtung 300 umfasst einen Druckbehälter 301, der über die Leitung 305 und das Ventil 302 mit dem Niederdruckabschnitt 200b verbunden ist, und der über die Leitung 306, den Verdichter 304 und das Ventil 303 mit dem Hochdruckabschnitt 200a verbunden ist. Mit Hilfe der Dichteänderungsvorrichtung 300 kann dem Entladekreislauf 200 Arbeitsgas A entnommen werden oder Arbeitsgas A zugeführt werden, sodass die Dichte des Arbeitsgases A und somit die Leistungsabgabe des zweiten Turboexpanders 250 beeinflusst werden kann, sodass der Entladekreislauf 200 regelbar mit Vollast oder Teillast betrieben werden kann.

[0039] Wie in Figur 3 dargestellt wird im ersten Kühler 270 vorzugsweise auf Umgebungstemperatur U gekühlt.

[0040] Wie aus den Figuren 2 und 3 ersichtlich fließt im Hochtemperaturregenerator 120 die Entladeströmungsrichtung A2 in entgegengesetzter Richtung zur Ladeströmungsrichtung A1. Das aus dem Hochtemperaturregenerator 120 ausströmende Arbeitsgas A wird über den zweiten Turboexpander 250 entspannt und dadurch gekühlt, und wird danach im zweiten Rekuperator 230 und im ersten Kühler 270 weiter gekühlt, bevor das Arbeitsgas A im zweiten Turboverdichter 210 komprimiert wird und anschliessend im zweiten Rekuperator 230 vorgewärmt wird, um danach wieder in den Hochtemperaturregenerator 120 einzuströmen. Der zweite Turboverdichter 210 und der zweite Turboexpander 250 sind auf derselben Welle 214 angeordnet, sodass der zweite Turboexpander 250 den zweiten Turboverdichter 210 antreibt. Der Welle 214 wird durch den Generator 290 Energie entnommen. An Stelle eines Generators könnte beispielsweise auch eine Arbeitsmaschine mit der Welle 214 verbunden sein.

[0041] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung könne der erste Turboverdichter 110 und der zweite Turboverdichter 210 und vorzugsweise auch der erste Turboexpander 140 und der zweite Turboexpander 250 je ein verstellbares Vorleitrad 110a, 210a, 140a, 250a umfassen. Ein Verstellen dieser Vorleiträder erlaubt es die Leistungsaufnahme beziehungsweise die Leistungsabgabe der Turboverdichter 110, 210 und der Turboexpander 140, 250 schnell zu ändern.

[0042] Figur 4 zeigt eine besonders vorteilhafte Ausgestaltung einer Energiespeichervorrichtung 1. Im Unterschied zu der in den Figuren 1 bis 3 dargestellten Energiespeichervorrichtung 1 mit zwei separaten Rekuperatoren 130 weist die in Figur 4 dargestellte Energiespeichervorrichtung 1 einen einzigen, gemeinsamen Rekuperator 130 auf. Das Arbeitsgas A wird mit Hilfe von Schaltmitteln 400, 401 wie Ventilen derart schaltbar geleitet, dass ein Ladekreislauf 100 beziehungsweise ein Entladekreislauf 200 entsteht, ähnlich dem in Figur 2 bzw. 3 dargestellten Ladekreislauf 100 bzw. Entladekreislauf 200, mit Ausnahme, dass nur ein einziger, gemeinsamer Rekuperator 130 vorhanden ist.

[0043] In einer weiteren, besonders vorteilhaften Ausgestaltung umfasst die Energiespeichervorrichtung 1 nebst dem Ladekreislauf 100 und dem Entladekreislauf 200 zudem noch ein Vorwärmesystem 150 für ein zirkulierendes Vorwärmfluid V. Das Vorwärmesystem 150 umfasst insbesondere einen ersten Fluidspeicher 152, in welchem ein erwärmtes Vorwärmfluid V1 gespeichert wird, einen zweiten Fluidspeicher 222, in welchem ein abgekühltes Vorwärmfluid V2 gespeichert wird, sowie Fluidleitungen 155, 224 und gegebenenfalls Fördermittel 153, 223 um das Vorwärmfluid V im Vorwärmesystem 150 zu zirkulieren und insbesondere dem Vorwärmer 151 und dem Kühler 221 zuzuführen. Im dargestellten Ausführungsbeispiel wird das erwärmte Vorwärmfluid V, ausgehend vom ersten Fluidspeicher 152 dem Vorwärmer 151 zugeführt, und das danach abgekühlte Vorwärmfluid V dem zweiten Fluidspeicher 222 zugeführt. Das abgekühlte Vorwärmfluid V des zweiten Fluidspeichers 222 wird einem Kühler 221 zugeführt, und das danach erwärmte Vorwärmfluid V dem ersten Fluidspeicher 152 zugeführt. Als Vorwärmfluid V wird vorzugsweise Wasser verwendet. Der zweite Fluidspeicher 222 könnte als ein Behälter ausgestaltet sein, sodass das Vorwärmesystem 150 einen geschlossenen Kreislauf ausbildet. Der zweite Fluidspeicher 222 könnte auch offen ausgestaltet sein, wobei an Stelle eines Behälters auch ein Gewässer, beispielsweise ein See, geeignet wäre zur Aufnahme des abgekühlten Vorwärmfluides V beziehungsweise zur Bereitstellung von Kühlfluid V.

[0044] In einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung wird die Energiespeichervorrichtung 1 zur Speicherung von elektrischer Energie und zur zeitlich versetzten Abgabe von elektrischer Energie verwendet. Figur 4 zeigt eine derartige Speichervorrichtung für elektrische Energie umfassend die Energiespeichervorrichtung 1 sowie umfassend einen Elektromotor 170 und einen Generator 290. In einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung sind der Elektromotor 170 und der Generator 290 zu einer einzigen Maschine zusammengefasst unter Ausbildung eines sogenannten Motorgenerators. Die in Figur 4 dargestellte Energiespeichervorrichtung 1 ist daher besonders günstig herstellbar, weil nur ein einziger Motorgenerator 170/290, ein einziger Hochtemperaturregenerator 120 und ein einziger Rekuperator 130 erforderlich sind.

[0045] Zur Funktionsweise der in Figur 4 dargestellten, besonders vorteilhaften Energiespeichervorrichtung 1 werden nachfolgend noch einige Details erläutert. Der erste Turboverdichter 110, der erste Turboexpander 140, der erste Rekuperator 130 sowie der Vorwärmer 151 bilden im Ladekreislauf 100 eine Wärmepumpe. Das vorgeheizte Arbeitsgas A wird dem ersten Turboverdichter 110 zugeführt, darin verdichtet und erwärmt, und durchströmt als Arbeitsgas A den

Ladekreislauf 100. Das Arbeitsgas A wird danach durch den Hochtemperaturregenerator 120 geleitet, dabei abgekühlt und nachfolgend im Rekuperator 130 nochmals abgekühlt. Das Arbeitsgas A wird danach im ersten Turboexpander 140 entspannt auf den tiefsten Druck im Ladekreislauf 100, beispielsweise auf einen Druck von etwa 1 bis 5 bar, wobei die dadurch im ersten Turboexpander 140 freigesetzte Energie zum teilweisen Antrieb des ersten Turboverdichters 110 genutzt wird. Das Arbeitsgas A fließt danach durch den Vorwärmer 151 und wird dabei vorgewärmt. Der Vorwärmer 151 ist mit dem Vorwärmesystem 150 verbunden und bezieht die Wärmeenergie aus dem ersten Fluidspeicher 152 für das warme Vorwärmfluid, in der dargestellten Ausführungsform als warmes Wasser.

[0046] Der Entladekreislauf 200 umfasst einen zweiten Turboverdichter 210, ausgestaltet als ein zwischengekühlter Gasturbinenverdichter mit einem Kühler 221, und umfasst den Rekuperator 130, den Hochtemperaturregenerator 120, den zweiten Turboexpander 250 und den ersten Kühler 270, der zur Umgebung U kühlt. Der Kühler 221 ist über Leitungen 224 mit dem Vorwärmesystem 150 verbunden, wobei kühles Fluid dem Speicher 222 entnommen wird, über das Fördermittel 223 dem Kühler 221 zugeführt wird, und wobei das erwärmte Fluid dem Speicher 152 zugeführt wird.

[0047] Figur 5 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel eines Ladekreises 100 mit einer Dichteänderungsvorrichtung 300. Im Unterschied zu dem in Figur 2 dargestellten Ladekreislauf 100 umfasst der in Figur 5 dargestellte Ladekreislauf 100 einen einzigen Hochtemperaturregenerator 120 bestehend aus vier parallel geschalteten Teilregeneratoren 120a, 120b, 120c, 120d. Im gesamten Ladekreislauf 100 ist somit ein einziger Regenerator 120 angeordnet, das heisst, der Ladekreislauf 100 weist keine nacheinander in Serie geschalteten Regeneratoren auf. Der einzige Regenerator 120 kann als einziger Behälter ausgestaltet sein, oder kann wie in den Ausführungsbeispielen gemäss Figuren 5 und 6 dargestellt eine Mehrzahl von parallel geschalteten Teilregeneratoren aufweisen. Der Ladekreislauf 100 umfasst einen Hochdruckabschnitt 100a sowie einen Niederdruckabschnitt 110b, wobei die Teilregeneratoren 120a, 120b, 120c, 120d im Hochdruckabschnitt 100a angeordnet sind, und wobei Ventile 307 bis 310 sowie 321 bis 324 angeordnet sind, um die Teilregeneratoren 120a, 120b, 120c, 120d einzeln oder mehrere parallel Fluid leitend mit dem Hochdruckabschnitt 100a zu verbinden. Die Ventile 307 bis 310 sowie 321 bis 324 müssen vorzugsweise nur Ein- und Ausschalten und sind beispielsweise als Klappenventile ausgestaltet.

[0048] Es kann sich zum Beispiel aus Kostengründen als vorteilhaft erweisen anstelle eines einzigen, grossen Hochtemperaturregenerators 120 eine Mehrzahl kleinere, parallel geschaltete Teilregeneratoren 120a, 120b, 120c, 120d vorzusehen. Die Anzahl parallel geschalteter Teilregeneratoren 120a, 120b, 120c, 120d kann beliebig gross sein, wobei sich eine Anzahl zwischen 2 und 10 als besonders vorteilhaft erweist. Üblicherweise ist jeweils nur ein einziger der Teilregeneratoren 120a, 120b, 120c, 120d, in Figur 5 beispielsweise der Teilregenerator 120a, aktiv im Hochdruckabschnitt 120a in den Kreislauf eingebunden und vom zirkulierenden Arbeitsgas A durchströmt, während die weiteren, vorübergehend inaktiven Teilregeneratoren 120b, 120c, 120d auf Grund der geschlossenen Ventile keine Fluid leitende Verbindung zum Hochdruckabschnitt 120a aufweisen und somit vom Lade- bzw. Entladeprozess entkoppelt sind. Die einzelnen Teilregeneratoren 120b, 120c, 120d sind entweder erhitzt beziehungsweise vollständig geladen und stehen zur Entleerung beziehungsweise zum Entladeprozess bereit, oder sie sind kalt und stehen zur Erwärmung beziehungsweise zum Laden bereit wobei das obere Ende generell heiss ist und das untere Ende generell eine tiefere Temperatur aufweist. Die einzelnen Teilwärmespeicher 120a, 120b, 120c, 120d können auch teilweise geladen beziehungsweise teilweise entladen sein. Das Innenvolumen eines Teilregenerators ist mit einem wärmespeichernden Material und einem Gasvolumen gefüllt, wobei das Gasvolumen bzw. die Porosität des Speichermaterials vorzugsweise zwischen 30-60 % des Innenvolumens des Teilregenerators beträgt. In einer vorteilhaften Ausgestaltung umfasst der Ladekreis 100 eine Dichteänderungsvorrichtung 300 zur Leistungsregelung.

[0049] Der Hochtemperaturregenerator 120, umfassend eine Mehrzahl parallel geschalteter Teilregeneratoren 120a, 120b, 120c, 120d, kann, wie aus den Figuren 1 bis 3 ersichtlich, durch ein entsprechendes Schalten der Ventile 400, 401 unter Ausbildung eines geschlossenen Kreislafs Fluid leitend mit dem Ladekreislauf 100 oder dem Entladekreislauf 200 verbunden werden.

[0050] In einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung der Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung 1 wird zumindest einer und vorzugsweise mehrere der inaktiven Teilregeneratoren 120b, 120c, 120d beziehungsweise deren Gasvolumen verwendet zur Zwischenspeicherung von Arbeitsgas A, um dadurch die Dichte beziehungsweise den Druck des im Ladekreislauf 100 beziehungsweise im Entladekreislauf 200 zirkulierenden Arbeitsgases A zu verändern, um dadurch die Leistung zu regeln. Figur 6 zeigt ein derartiges Ausführungsbeispiel an Hand einer Anordnung des Hochtemperaturregenerators 120 im Ladekreis 100, wobei der Hochtemperaturregenerator 120, im Vergleich zu der in Figur 5 dargestellten Ausführungsform, nur zwei parallel geschaltete Teilregeneratoren 120a, 120b umfasst, wobei die Anordnung nebst den bereits in Figur 5 offenbarten Schaltventilen 307, 308, 309, 310 zusätzliche Komponenten umfasst, nämlich Ventile 312, 313, 314 und Leitungen 317, 318 und 319. Diese zusätzlichen Komponenten, in Kombination mit den Teilregeneratoren 120a, 120b, erlauben es eine Dichteänderungsvorrichtung 300 ausbilden, und ersetzen deshalb die in Figur 5 dargestellte Dichteänderungsvorrichtung 300.

[0051] Die Funktion der in Figur 6 verwendeten Dichteänderungsvorrichtung 300 wird nachfolgend an Hand unterschiedlicher Betriebszustände erläutert. Der Ladekreislauf 100 umfasst einen Hochdruckabschnitt 100a, in welchem das Arbeitsgas A einen höheren Druck von beispielsweise 8 bar aufweist. Der Ladekreislauf 100 umfasst zudem einen

Niederdruckabschnitt 100b, in welchem das Arbeitsgas A einen niederen Druck von beispielsweise 2 bar aufweist. Der erste Teilregenerator 120a wird aktiv geschaltet, bildet Teil des Ladekreislaufes 100, und ist vom Arbeitsgas A durchströmt. Der zweite Teilregenerator 120b ist als Druckspeicher 301 verwendet, wobei der zweite Teilregenerator 120b nicht aktiv in den Ladekreislauf 100 geschaltet ist, sondern als Zwischenspeicher für das Arbeitsgas A dient. Die Masse des Arbeitsgases A im Ladekreislauf 100 wird geändert, indem Arbeitsgas A zwischen dem zweiten Teilregenerator 120b und dem Ladekreislauf 100 verschoben wird.

[0052] Im ersten Betriebszustand sind die Ventile 309 und 310 geöffnet, und die Ventile 307 und 308 sowie die Ventile 312, 313 und 314 sind geschlossen, sodass der erste Teilregenerator 120a Teil des Ladekreislaufs 100 bildet und vom Arbeitsgas A durchströmt ist, wogegen der zweite Teilregenerator 120b vom Ladekreislauf 100 getrennt ist. Der Druck im Teilregenerator 120b sei tief, d.h. bei 2 bar. Das Arbeitsgas A im Hochdruckabschnitt 100a weist einen hohen Druck von 8 bar auf. In diesem Zustand hat ein Öffnen des Ventils 312 zur Folge, dass Arbeitsgas A über die Leitung 319 in den zweiten Teilregenerator 120b fließt, sodass dem Ladekreislauf 100 Masse entnommen wird und die Dichte sowie der Druck des Arbeitsgases im Ladekreislauf 100 somit sinkt. Sobald dem Ladekreislauf 100 genügend Arbeitsgas A bzw. eine genügend grosse Masse entnommen ist, wird das Ventil 312 wieder geschlossen.

[0053] Der Druck im zweiten Teilregenerator 120b steigt maximal auf den Druck des ersten Teilregenerators 120a, sodass in einem zweiten Betriebszustand der zweite Teilregenerator 120b einen erhöhten Druck aufweist. Der maximal erreichbare Druck ist abhängig vom Verhältnis des Volumens des aktiven Ladekreislaufs 100 und des Teilregenerators 120b. In diesem Zustand hat ein Öffnen des Ventils 313 zur Folge, dass Arbeitsgas A über die Leitung 317 aus dem zweiten Teilregenerator 120b in den Niederdruckabschnitt 100b fließt, sodass dem Ladekreislauf 100 Masse zugeführt wird und die Dichte sowie der Druck des Arbeitsgases A im Ladekreislauf 100 somit steigt. Sobald dem Ladekreislauf 100 genügend Arbeitsgas A bzw. eine genügend grosse Masse zugeführt ist wird das Ventil 313 wieder geschlossen.

[0054] Durch diesen hiermit beschriebenen ersten und zweiten Betriebszustand ist es somit möglich den zweiten Teilregenerator 120b als Druckspeicher 301 zu nutzen, um die Masse Arbeitsgas A im Ladekreislauf 100 zu ändern.

[0055] Um dem Ladekreislauf 100 eine noch grössere Masse an Arbeitsgas A zuzuführen beziehungsweise abzuführen, ist es vorteilhaft, eine Mehrzahl von parallel geschalteten Teilregeneratoren 120b, 120c, 120d vorzusehen, wie dies beispielsweise in Figur 5 dargestellt ist. In einer möglichen Ausführungsform ist der erste Teilregenerator 120a Teil des Ladekreislaufs 100 und ist vom Arbeitsgas A durchströmt, wogegen der zweite, dritte und vierte Teilregenerator 120b, 120c, 120d über Ventile vom Ladekreislauf 100 getrennt, aber in diesen zuschaltbar sind. Jeder dieser drei Teilregeneratoren 120b, 120c, 120d kann über Ventile mit dem Hochdruckabschnitt 100a oder dem Tiefdruckabschnitt 100b verbunden werden, sodass ein entsprechender Austausch des Arbeitsgases A zwischen dem jeweiligen Teilregeneratoren 120b, 120c, 120d und dem Ladekreislauf 100 stattfindet. Je mehr Teilregeneratoren 120b, 120c, 120d zum Austausch des Arbeitsgases A zur Verfügung stehen, desto grösser ist die Gesamtmasse an Arbeitsgas A, die zwischen dem Ladekreislauf 100 und den Teilregeneratoren 120b, 120c, 120d, welche als Massespeicher dienen, ausgetauscht werden kann.

[0056] Das am Beispiel des Ladekreislaufs 100 beschriebene Zu- und Abführen von Arbeitsgas A in und aus dem Ladekreislauf 100 durch Schalten von Ventilen kann auf analoge Weise auch im Entladekreislauf 200 erfolgen. Figur 7 zeigt einen Entladekreislauf 200 mit einem ersten und einem zweiten Teilregenerator 120a, 120b.

Der Entladekreislauf 200 umfasst einen Hochdruckabschnitt 200a, in welchem das Arbeitsgas A einen höheren Druck von beispielsweise 8 bar aufweist. Der Entladekreislauf 200 umfasst zudem einen Niederdruckabschnitt 200b, in welchem das Arbeitsgas A einen niederen Druck von beispielsweise 2 bar aufweist. Der erste Teilregenerator 120a wird aktiv geschaltet, bildet Teil des Entladekreislaufes 200, und ist vom Arbeitsgas A durchströmt. Der zweite Teilregenerator 120b ist als Druckspeicher 301a verwendet, wobei der zweite Teilregenerator 120b nicht aktiv in den Ladekreislauf 100 geschaltet ist, sondern als Zwischenspeicher für das Arbeitsgas A dient. Der Masse des Arbeitsgases A im Entladekreislauf 200 wird geändert, indem Arbeitsgas A zwischen dem zweiten Teilregenerator 120b und dem Entladekreislauf 200 ausgetauscht wird.

[0057] Im ersten Betriebszustand sind die Ventile 309 und 310 geöffnet, und die Ventile 307 und 308 sowie die Ventile 312, 313 und 314 sind geschlossen, sodass der erste Teilregenerator 120a Teil des Entladekreislaufs 200 bildet und vom Arbeitsgas A durchströmt ist, wogegen der zweite Teilregenerator 120b vom Entladekreislauf 200 getrennt ist. Der Druck im Teilregenerator 120b sei tief, d.h. bei 2 bar. Das Arbeitsgas A im Hochdruckabschnitt 200a weist einen hohen Druck von 8 bar auf. In diesem Zustand hat ein Öffnen des Ventils 312 zur Folge, dass Arbeitsgas A über die Leitung 319 in den zweiten Teilregenerator 120b fließt, sodass dem Entladekreislauf 200 Masse entnommen wird und die Dichte sowie der Druck des Arbeitsgases im Entladekreislauf 200 somit sinkt. Sobald dem Entladekreislauf 200 genügend Arbeitsgas A bzw. eine genügend grosse Masse entnommen ist wird das Ventil 312 wieder geschlossen.

[0058] Der Druck im zweiten Teilregenerator 120b steigt maximal auf den Druck des ersten Teilregenerators 120a, sodass in einem zweiten Betriebszustand der zweite Teilregenerator 120b einen erhöhten Druck aufweist. Der maximal erreichbare Druck ist abhängig vom Verhältnis des Volumens des aktiven Ladekreislaufs 100 und des Teilregenerators 120b. In diesem Zustand hat ein Öffnen des Ventils 313 zur Folge, dass Arbeitsgas A über die Leitung 317 aus dem zweiten Teilregenerator 120b in den Niederdruckabschnitt 200b fließt, sodass dem Entladekreislauf 200 Masse zuge-

führt wird und die Dichte sowie der Druck des Arbeitsgases A im Entladekreislauf 200 somit steigt. Sobald dem Entladekreislauf 200 genügend Arbeitsgas A bzw. eine genügend grosse Masse zugeführt ist wird das Ventil 313 wieder geschlossen.

[0059] Durch diesen hiermit beschriebenen ersten und zweiten Betriebszustand ist es somit möglich den zweiten Teilregenerator 120b als Druckspeicher 301a zu nutzen, um die Masse Arbeitsgas A im Entladekreislauf 200 zu ändern.

[0060] Um dem Entladekreislauf 100 eine noch grössere Masse an Arbeitsgases A zuzuführen beziehungsweise abzuführen ist es, wie mit Figur 6 bereits beschrieben, vorteilhaft eine Mehrzahl von parallel geschalteten Teilregeneratoren 120b, 120c, 120d vorzusehen, wie dies beispielsweise in Figur 5 dargestellt ist. In einer möglichen Ausführungsform bildet der erste Teilregenerator 120a Teil des Entladekreislaufs 200 und ist vom Arbeitsgas A durchströmt, wogegen der zweite, dritte und vierte Teilregenerator 120b, 120c, 120d über Ventile vom Entladekreislauf 200 getrennt, aber in diesen zuschaltbar sind. Jeder dieser drei Teilregeneratoren 120b, 120c, 120d kann über Ventile mit dem Hochdruckabschnitt 200a oder dem Tiefdruckabschnitt 200b verbunden werden, sodass ein entsprechender Austausch des Arbeitsgases A zwischen dem jeweiligen Teilregeneratoren 120b, 120c, 120d und dem Entladekreislauf 200 stattfindet. Je mehr Teilregeneratoren 120b, 120c, 120d zum Austausch des Arbeitsgases A zur Verfügung stehen, desto grösser ist die Gesamtmasse an Arbeitsgas A, die zwischen dem Entladekreislauf 200 und den Teilregeneratoren 120b, 120c, 120d, welche als Massespeicher dienen, ausgetauscht werden kann.

[0061] Der Ladekreislauf 100 und/oder der Entladekreislauf 200 können auch zwei oder mehrere Druckänderungsvorrichtungen 300 umfassen. Figur 7 zeigt ein Ausführungsbeispiel des Entladekreislaufs 200 umfassend zwei Druckänderungsvorrichtungen 300. Die erste Druckänderungsvorrichtung 300 umfasst, wie vorhin mit Figur 7 beschrieben, den Druckspeicher 301a, die Ventile 309, 310, 307, 308, 312, 313 und 314 sowie die entsprechenden Leitungen, wie in Figur 7 dargestellt. Die zweite Druckänderungsvorrichtung 300 umfasst einen Druckbehälter 301, Leitungen 305, 306, Ventile 302, 303 sowie einen Verdichter 304. Der Ladekreislauf 100 und/oder der Entladekreislauf 200 können die erste und/oder die zweite Druckänderungsvorrichtungen 300 umfassen.

[0062] Figur 9 zeigt das Betriebsverhalten der erfindungsgemässen Speichervorrichtung 1 bei Voll- und Teillast. Die Abszissenachse zeigt für den Ladevorgang die der Speichervorrichtung 1 über den Elektromotor 170 zugeführte Leistung P_z in Prozent, beziehungsweise zeigt für den Entladevorgang die über den Generator 290 abgeführte Leistung P_z in Prozent. Die maximale Leistung P_{zmax} entspricht der maximal möglichen Leistung des Elektromotors beziehungsweise des Generators. Die Ordinatenachse zeigt für den Ladeprozess die Leistungszahl des Wärmepumpenprozesses und zeigt für den Entladeprozess den Wirkungsgrad des Gasturbinenprozesses. Die Kurve C umfasst einen ersten Kurvenabschnitt C1 sowie einen zweiten Kurvenabschnitt C2 und zeigt das Betriebsverhalten einer erfindungsgemässen Speichervorrichtung 1 umfassend zwei parallel angeordnete Teilregeneratoren 120a, 120b, wie dies in den Figuren 6, 7 und 8 dargestellt ist. Der erste Kurvenabschnitt C1 zeigt den Verlauf der Leistungszahl beim Ladevorgang bzw. den Wirkungsgrad beim Entladen mit der im Zusammenhang mit den Figuren 6 und 7 beschriebenen Dichteregelung. Der erste Kurvenabschnitt C1 verläuft zwischen 70% und 100% der zugeführten bzw. abgeführten Leistung P_z horizontal, was bedeutet, dass im Bereich zwischen 70% und 100% keine Änderung der Leistungszahl bzw. des Wirkungsgrads beim Entladen auftritt. Die erfindungsgemässe Speichervorrichtung 1 weist somit den Vorteil auf, dass diese auch im Teillastbetrieb während des Lade- und Entladevorgangs mit konstanter Leistungszahl beim Laden bzw. konstantem Wirkungsgrad beim Entladen betreibbar ist. Der zweite Kurvenabschnitt C2 zeigt, dass die erfindungsgemässe Speichervorrichtung 1 umfassend zwei Teilregeneratoren 120a, 120b auch bei einer zugeführten bzw. abgeführten Leistung P_z von unterhalb 70% der maximalen Leistung betrieben werden kann. Dieser zweite Kurvenabschnitt C2, welcher sich über einen Teillastbereich zwischen etwa 45% und 70% erstreckt, wird durch ein Verstellen der Vorleiträder 110a, 140a erreicht bzw. durch Verstellung der Vorleiträder 210a und 250a. Der zweite Kurvenabschnitt C2 weist somit einerseits den Nachteil auf, dass die Leistungszahl beim Laden bzw. der Wirkungsgrad beim Entladen sinken. Andererseits weist der zweite Kurvenabschnitt C2 den Vorteil auf, dass sich die Leistungsaufnahme bzw. Leistungsabgabe der erfindungsgemässen Speichervorrichtung 1 in einem Teilleistungsbereich zwischen 45% und 100% der maximal zugeführten bzw. abgeführten Leistung P_{zmax} betreiben lässt.

[0063] Die Kurve B zeigt den Verlauf der Leistungszahl des Wärmepumpenprozesses beziehungsweise den Wirkungsgrad des Gasturbinenprozesses für den Lade- bzw. Entladevorgang für eine Speichervorrichtung ohne Dichteänderungsvorrichtung 300, sodass die Kurve B nur den durch ein Verstellen der Vorleiträder 110a, 140a bzw. durch Verstellen der Vorleiträder 210a und 250a erreicht wird. Aus einem Vergleich des Verlaufs der Kurven B und C ist ersichtlich, dass die erfindungsgemässe Speichervorrichtung 1 den Vorteil aufweist, dass diese im Teillastbereich zwischen 70% und 100% einen konstanten oder im Wesentlichen konstanten Verlauf von Leistungszahl bzw. Wirkungsgrad aufweist.

[0064] Die Kurve D zeigt den Verlauf der Leistungszahl des Wärmepumpenprozesses bzw. den Wirkungsgrad des Gasturbinenprozesses für den Lade- bzw. Entladevorgang für eine Speichervorrichtung 1 mit drei Teilregeneratoren 120a, 120b, 120c, wobei beispielsweise im ersten Teilregenerator 120a die Wärme gespeichert wird, und wobei der zweite und der dritte Teilregenerator 120b, 120c als Fluidspeicher verwendet werden. Die Wärme könnte auch im zweiten oder dritten Teilregenerator 120b, 120c gespeichert werden, sodass die übrigen zwei Teilregeneratoren den Fluidspei-

cher ausbilden. Der erste Kurvenabschnitt D1 zeigt den Verlauf der Leistungszahl beim Ladevorgang bzw. den Wirkungsgrad beim Entladen mit der im Zusammenhang mit den Figuren 6 und 7 beschriebenen Dichteregelung. Der erste Kurvenabschnitt D1 verläuft zwischen 50% und 100% der zugeführten bzw. abgeführten Leistung P_z horizontal, was bedeutet, dass im Bereich zwischen 50% und 100% keine Änderung der Leistungszahl bzw. des Wirkungsgrads beim Entladen auftritt. Der zweite Kurvenabschnitt D2, welcher sich über einen Teillastbereich zwischen etwa 25% und 50% erstreckt, wird durch ein Verstellen der Vorleiträder 110a, 140a bzw. der Vorleiträder 210a und 250a erreicht.

[0065] Die Kurve E zeigt den Verlauf der Leistungszahl des Wärmepumpenprozesses bzw. den Wirkungsgrad des Gasturbinenprozesses für den Lade- bzw. Entladevorgang für eine Speichervorrichtung 1 mit vier Teilregeneratoren 120a, 120b, 120c, 120d wobei beispielsweise im ersten Teilregenerator 120a die Wärme gespeichert wird, und der zweite, dritte und vierte Teilregenerator 120b, 120c, 120d als Druckspeicher verwendet werden. Der erste Kurvenabschnitt E1 zeigt den Verlauf der Leistungszahl beim Ladevorgang bzw. den Wirkungsgrad beim Entladen mit der im Zusammenhang mit den Figuren 6 und 7 beschriebenen Dichteregelung. Der ersten Kurvenabschnitt E1 verläuft zwischen 35% und 100% der maximal zugeführten Leistung bzw. abgeführten Leistung P_z horizontal, was bedeutet, dass im Bereich zwischen 35% und 100% keine Änderung der Leistungszahl bzw. des Wirkungsgrads beim Entladen auftritt. Dies zweite Kurvenabschnitt E2, welcher sich über einen Teillastbereich zwischen etwa 10% und 35% erstreckt, wird durch ein Verstellen der Vorleiträder 110a, 140a bzw. der Vorleiträder 210a und 250a erreicht.

[0066] Die Figuren 10, 11 und 12 zeigen beispielhaft mögliche Betriebsverfahren der erfindungsgemässen Speichervorrichtung 1.

[0067] Die Figur 10 zeigt beispielhaft einen möglichen Betriebsverlauf der Speichervorrichtung 1, beispielsweise bei einem Inselbetrieb, bei welchem ein elektrisches Netz nur mit Wind- und/oder Solarenergie betrieben wird. Der Verlauf der Kurve F zeigt in Funktion der Zeit die vom Speicher aufgenommene elektrische Leistung, wobei diese elektrische Leistung vorzugsweise die überschüssige, im elektrischen Netz vorhandene Leistung darstellt. Die Speichervorrichtung 1 wird im Wärmepumpenbetrieb betrieben und die Energie über den Ladekreislauf 100 gespeichert, sodass Energie entsprechend dem Verlauf der Kurve H gespeichert wird. Dabei wird die Wärmepumpe, entsprechend der im Netz überschüssigen elektrischen Leistung, beispielsweise zuerst mit 100% der Nennleistung P_{Zmax} betrieben, anschliessend mit einer Teillast von 20%, anschliessend wieder mit Nennleistung von 100% und anschliessend wieder mit unterschiedlichen Teillasten. Dabei wird dem Regenerator 120 zunehmend Wärmeenergie zugeführt. Die Kurve H zeigt die im Regenerator 120 gespeicherte Wärmeenergie, wobei die Kurve H mit einer Speicherfüllung von 0% startet, und wobei der Regenerator 120 vollständig gefüllt wird, bis zu einer Speicherfüllung von 100 %. In einem weiteren Beispiel, beispielsweise nachts, benötigt das elektrische Netz ständig zusätzliche Energie, sodass der Regenerator 120 über den Entladekreislauf 200 entladen werden muss. Die Kurve J zeigt einen möglichen Entladebetrieb der Speichervorrichtung 1 in Funktion der Zeit. Die Kurve J zeigt somit den Betrieb des Endkreislaufes 200. Dabei wird der zweite Turboexpander 250 beziehungsweise der Generator G zuerst mit 100% der Nennleistung P_{Zmax} betrieben, anschliessend mit einer Teillast von 20%, anschliessend wieder mit Teillast von 80% und anschliessend weiter mit unterschiedlichen Lasten. Dabei wird dem Regenerator 120 zunehmend Wärmeenergie entzogen. Die Kurve I zeigt die im Regenerator 120 gespeicherte Wärmeenergie, wobei die Kurve I mit einer Speicherfüllung von 100% startet, und wobei der Regenerator 120 im Verlaufe der Zeit vollständig entleert wird, bis zu einer Speicherfüllung von 0 %.

[0068] Die Figur 11 zeigt das Betriebsverhalten der Speichervorrichtung 1 bei einer Verwendung zur Netzstabilisierung eines elektrischen Verbundnetzes, wobei es keine Rolle spielt ob das elektrische Netz erneuerbare Energiequellen umfasst oder nicht. In einem vorteilhaften Verfahren wird die Speichervorrichtung 1 ständig in einem Teillastbereich gefahren, beispielsweise mit einer Teillast von 40% oder 60%, damit die Speichervorrichtung 1 sehr schnell elektrische Leistung vom Verbundnetz aufnehmen beziehungsweise an dieses abgeben kann. Die Kurve L zeigt beispielhaft einen Verlauf anlässlich einer Phase, während der im Verbundnetz eher zu viel elektrische Leistung vorhanden ist. Der Verlauf der Kurve L zeigt in Funktion der Zeit die überschüssige, dem elektrischen Netz entnommene elektrische Leistung. Die Speichervorrichtung 1 wird im Wärmepumpenbetrieb betrieben und die Energie dem Motor M über den Ladekreislauf 100 entnommen und im Regenerator 120 gespeichert, sodass Energie entsprechend dem Verlauf der Kurve L gespeichert wird. Wie dem Verlauf der Kurve K zu entnehmen ist wird die Speichervorrichtung 1 zu Beginn kontinuierlich mit einer tiefen Leillast von 20% betrieben. Die Speichervorrichtung 1 befindet sich damit quasi in einer Lauerstellung, um den Verbundnetz in kurzer Zeit elektrische Leistung zu entnehmen. Dabei wird der Ladekreislauf 100 bzw. die Wärmepumpe2, entsprechend der im Netz überschüssigen elektrischen Leistung wie in Kurve K dargestellt betrieben, indem beispielsweise zuerst mit 20% der Nennleistung P_{Zmax} gefahren wird, anschliessend mit Volllast von 100%, anschliessend mit einer Teillast von 40%, und anschliessend wieder mit unterschiedlichen Teillasten. Dabei wird dem Regenerator 120 zunehmend Wärmeenergie zugeführt. Die Kurve L zeigt die im Regenerator 120 gespeicherte Wärmeenergie, wobei die Kurve L mit einer Speicherfüllung von 0% startet, und wobei der Regenerator 120 vollständig gefüllt wird, bis zu einer Speicherfüllung von 100 %.

[0069] Die Kurve O zeigt beispielhaft einen Verlauf anlässlich einer Phase, während der im elektrischen Verbundnetz tendenziell eher zu wenig elektrische Leistung vorhanden ist. Der Verlauf der Kurve O zeigt in Funktion der Zeit die dem elektrischen Netz zugeführte elektrische Leistung. Die Speichervorrichtung 1 wird mit dem Entladekreislauf 200 betrieben

und die Energie dem Regenerator 120 entnommen und über den Generator G in das elektrische Verbundnetz eingespeist, sodass elektrische Leistung entsprechend dem Verlauf der Kurve O eingespeist wird. Wie dem Verlauf der Kurve O zu entnehmen ist, wird die Speichervorrichtung 1 zu Beginn kontinuierlich mit einer tiefen Teillast von 20% betrieben. Die Speichervorrichtung 1 befindet sich damit quasi in einer Lauerstellung, um dem Verbundnetz in kurzer Zeit elektrische Leistung zuzuführen. Dabei wird der Entladekreislauf 200 entsprechend der im Netz erforderlichen elektrischen Leistung betrieben, wie in Kurve O dargestellt, indem beispielsweise zuerst mit 20% der Nennleistung P_{Zmax} gefahren wird, anschliessend mit Volllast von 100%, anschliessend mit einer Teillast von 20%, und anschliessend wieder mit unterschiedlichen Teillasten. Dabei wird dem Regenerator 120 zunehmend Wärmeenergie abgeführt. Die Kurve N zeigt die im Regenerator 120 gespeicherte Wärmeenergie, wobei die Kurve L mit einer Speicherfüllung von 100% startet, und wobei der Regenerator 120 vollständig entleert wird, bis zu einer Speicherfüllung von 0 %.

[0070] Die Figur 12 zeigt beispielhaft einen Betrieb der erfindungsgemässen Speichervorrichtung 1, während welchem je nach Netzerfordernis eine Aufnahme oder eine Abgabe von elektrischer Leistung stattfindet. Diese Betriebsart ist insbesondere auch zur Netzstabilisierung geeignet. Die Figur 12 zeigt mit der Kurve P einen Wärmepumpenbetrieb der Speichervorrichtung 1 in Funktion der Zeit. Dabei wird dem Regenerator 120, wie aus der Kurve Q ersichtlich, Wärmeenergie zugeführt. Die Kurve Q zeigt die im Regenerator 120 gespeicherte Wärmeenergie. Die Kurve R zeigt einen Turbinenbetrieb der Speichervorrichtung 1 in Funktion der Zeit. Die Kurve R zeigt somit den Betrieb des Endladekreislaufes 200. Der Übergang des Betriebs zwischen der Kurve P und R erfolgt derart, dass ausgehend vom Ladekreislauf 100 der Regenerator 120 in den Entladekreislauf 200 geschaltet wird, sodass dem Regenerator 120 über den Gasturbinenbetrieb Wärme entzogen werden kann. Aus dem Verlauf der Kurve Q ist die Abnahme der im Regenerator 120 gespeicherten Wärmeenergie ersichtlich. Die Figur 12 zeigt anschliessend mit der Kurve T einen Wärmepumpenbetrieb der Speichervorrichtung 1 in Funktion der Zeit. Dabei wird dem elektrischen Netz entsprechend den Erfordernissen Leistung entzogen und dem Regenerator 120, wie aus der Kurve Q ersichtlich, Wärmeenergie zugeführt. Die Kurve W zeigt einen Gasturbinenbetrieb der Speichervorrichtung 1 in Funktion der Zeit. Die Kurve W zeigt somit wieder den Betrieb des Entladekreislaufes 200. Dabei wird dem Regenerator 120, wie aus der Kurve Q ersichtlich, Wärmeenergie entzogen und dem elektrischen Netz elektrische Leistung eingespeist. Die erfindungsgemässe Speichervorrichtung 1 wird in einem vorteilhaften Verfahren kontinuierlich mit dem in Figur 12 dargestellten Verfahren betrieben.

[0071] Figur 13 zeigt beispielhaft ein Verfahren wie die von der erfindungsgemässen Speichervorrichtung 1 beziehungsweise vom Ladekreislauf 100 aufgenommene Leistung schnell verändert werden kann. Die Kurve P zeigt die aufgenommene Leistung in %, welche von 100% der aktuellen Leistung auf 70 % reduziert wird. Die Kurve X zeigt die Änderung der Dichte im Ladekreislauf 10 in %0. Die Kurve X zeigt, dass die Dichte im Ladekreislauf 100 reduziert wird, was jedoch eine gewisse Zeit erfordert. Die Kurve Z zeigt die relative Stellung der Leiträder 110a, 140a. Die Vorleitradvorstellung weist zu Beginn den relativen Wert 80 auf. Um die Leistungsaufnahme des Ladekreislaufes 100 bzw. der Speichervorrichtung 1 schnell zu reduzieren wird die Vorleitradvorstellung auf den relativen Wert 30 geändert, was zur Folge hat, dass der Winkel der Leiträder verändert wird, wobei die Stellung der Vorleiträder später wieder auf den ursprünglichen relativen Wert 80 wieder zurückgeführt wird. Die Änderung der Vorleitradvorstellung hat wie aus der Kurve P ersichtlich zur Folge, dass die vom Motor M aufgenommene Leistung P schnell absinkt. Die in Figur 12 dargestellte Kombination von Vorleitradvorstellung der Leiträder 110a, 140a und Dichteänderung des Arbeitsgases A hat zur Folge, dass die Leistung P in kurzer Zeit geändert werden kann. Die Figur 12 zeigt eine Reduzierung der von der Speichervorrichtung 1 aufgenommenen Leistung P. Auf analoge Weise kann auch eine Erhöhung der von der Speichervorrichtung 1 aufgenommenen Leistung P bewirkt werden, indem durch ein Verändern der Vorleitradvorstellung die aufgenommenen Leistung kurzfristig erhöht wird, daraufhin die Dichte im Arbeitsgas A geändert wird, und die Laufradstellung wieder die ursprüngliche Stellung einnimmt, sobald die geänderte Dichte bewirkt hat, dass die aufgenommene Leistung der vorgegebenen Leistung entspricht. Das beschriebene Verfahren ist analog im Entladekreislauf 200 verwendbar, indem die vom Entladekreislauf 200 abgegebenen elektrische Leistung dadurch schneller verändert werden kann, dass, wie in Figur 13 dargestellt, die Vorleitradvorstellung der Leiträder 210a, 250a im Entladekreislauf 200 verändert wird, wobei auch die Dichte des Arbeitsgases A verändert wird, und wobei die Vorleitradvorstellung nach einer bestimmten Zeit, wie in Figur 13 dargestellt, wieder in die Ausgangslage zurückverfahren wird.

[0072] Ein weiteres Verfahren die aufgenommene oder abgegebene Leistung der erfindungsgemässen Speichervorrichtung 1 schnell zu verändern besteht darin, die ursprüngliche Drehzahl von Verdichter und Expander zu verändern. Eine solche Drehzahländerung kann an Stelle der Stellungsveränderung der Vorleiträder oder in Kombination mit der Stellungsveränderung der Vorleiträder verwendet werden. Die Drehzahl wird vorzugsweise, wie im Verlauf der Kurve Z dargestellt, nur vorübergehend geändert, bis die Dichteregelung den erwünschten Zielwert alleine gewährleisten kann, sodass die Drehzahl wieder mit der ursprünglichen Drehzahl betrieben wird.

Patentansprüche

1. Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung (1) umfassend einen Ladekreislauf (100) sowie einen Endladekreislauf

(200) zum Fördern eines Arbeitsgases (A),

wobei der Ladekreislauf (100) sowie der Entladekreislauf (200) einen gemeinsamen Regenerator (120) umfassen, welcher umschaltbar entweder mit dem Ladekreislauf (100) oder dem Entladekreislauf (200) Fluid leitend verbunden ist unter Ausbildung eines geschlossenen Kreislaufs, um das Arbeitsgas (A) dem Regenerator (120) zuzuführen, wobei der Ladekreislauf (100) einen ersten Turboverdichter (110) sowie einen ersten Turboexpander (140) umfasst, wobei der erste Turboverdichter (110) vom ersten Turboexpander (140) sowie einem Elektromotor (170) angetrieben ist,

wobei der Entladekreislauf (200) einen zweiten Turboexpander (250) und einen zweiten Turboverdichter (210) umfasst, wobei der zweite Turboexpander (250) den zweiten Turboverdichter (210) sowie einen Generator (290) antreibt,

dadurch gekennzeichnet, dass eine Regelvorrichtung (500) sowie eine Dichteänderungsvorrichtung (300) derart angeordnet und ausgestaltet sind, dass diese den Druck des Arbeitsgases (A) im Ladekreislauf (100) und/oder im Entladekreislauf (200) ansteuerbar zu ändern erlauben, um die vom ersten Turboverdichter (110) aufnehmbare Leistung beziehungsweise die vom zweiten Turboexpander (250) abgebbare Leistung zu regeln.

2. Speichervorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Dichteänderungsvorrichtung (300) den Druck des Arbeitsgases (A) im Ladekreislauf (100) und/oder im Entladekreislauf (200) ansteuerbar sowohl anheben als auch absenken kann.

3. Speichervorrichtung nach Anspruch 1 bis 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Dichteänderungsvorrichtung (300) einen Druckbehälter (301) sowie zumindest ein erstes und ein zweites Ventil (302, 303) umfasst, und dass der Druckbehälter (301) über die Ventile (302, 303) Fluid leitend mit dem Ladekreislauf (100) und/oder mit dem Entladekreislauf (200) verbindbar ist, um Arbeitsgas (A) dem Druckbehälter (301) zuzuführen und dort zu speichern, oder um im Druckbehälter (301) gespeichertes Arbeitsgas (A) in den Ladekreislauf (100) und/oder den Entladekreislauf (200) rückzuführen.

4. Speichervorrichtung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Ladekreislauf (100) sowie der Entladekreislauf (200) je zwei Teilabschnitte umfasst, einen Hochdruckabschnitt (100a, 200a) sowie einen Niederdruckabschnitt (100b, 200b), sodass das Arbeitsgas (A) im Hochdruckabschnitt (100a, 200a) einen höheren Druck aufweist als im Niederdruckabschnitt (100b, 200b), und dass der Druckbehälter (301) über das erste Ventil (302) mit dem Niederdruckabschnitt (100b) verbindbar ist, und dass der Druckbehälter (301) über das zweite Ventil (303) mit dem Hochdruckabschnitt (100a) verbindbar ist, um durch ein Schalten des ersten und/oder zweiten Ventils (302, 303) den Druck des Arbeitsgases (A) im Druckbehälter (301) zu verändern.

5. Speichervorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der gemeinsame Regenerator (120) zumindest zwei und vorzugsweise drei oder vier parallel geschaltete Teilregeneratoren (120a, 120b, 120c, 120d) umfasst.

6. Speichervorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der erste Turboverdichter (110) und der zweite Turboverdichter (210) und vorzugsweise auch der erste Turboexpander (140) und der zweite Turboexpander (250) ein verstellbares Vorleitrad (110a, 210a) umfassen.

7. Verfahren zur Lastregelung einer Strom-Wärme-Strom-Speichervorrichtung (1) umfassend einen Ladekreislauf (100) mit einem ersten Turboverdichter (110), wobei dem ersten Turboverdichter (110) zum Erhitzen eines Arbeitsgases (A) mechanische Leistung zugeführt wird, umfassend einen Entladekreislauf (200) mit einem zweiten Turboexpander (250), wobei dem zweiten Turboexpander (250) zum Abkühlen des Arbeitsgases (A) mechanische Leistung entnommen wird, wobei der Ladekreislauf (100) beziehungsweise der Entladekreislauf (200) einen gemeinsamen Regenerator (120) umfasst, welcher wahlweise mit dem Ladekreislauf (100) oder dem Entladekreislauf (200) zu einem geschlossenen Kreislauf verbunden wird, sodass entweder das im Ladekreislauf (100) erhitzte Arbeitsgas (A) dem Regenerator (120) zugeführt wird oder dem Regenerator (120) heisses Arbeitsgas (A) entnommen und dem Entladekreislauf (200) zugeführt wird, wobei die vom ersten Turboverdichter (110) aufgenommene mechanische Leistung und/oder die vom zweiten Turboexpander (250) abgegebene mechanische Leistung durch ein Ändern des Drucks des Arbeitsgases (A) geregelt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Druck des Arbeitsgases (A) im Ladekreislauf (100) und/oder im Entladekreislauf (200) angehoben wird um die vom ersten Turboverdichter (110) aufgenommene mechanische Leistung und/oder die vom zweiten Turboexpander (250) abgegebene mechanische Leistung zu erhöhen, und dass der Druck des Arbeitsgases (A) abgesenkt wird, um die vom ersten Turboverdichter (110)

aufgenommene mechanische Leistung und/oder die vom zweiten Turboexpander (250) abgegebene mechanische Leistung zu reduzieren.

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Ladekreislauf (100) sowie der Entladekreislauf (200) einen einzigen, gemeinsamen Regenerator (120) umfassen, welchem das Arbeitsgas (A) zugeführt wird, oder aus welchem das Arbeitsgas (A) abgeführt wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** der erste Turboverdichter (110) des Ladekreislaufs (100) und/oder der zweite Turboexpander (250) des Entladekreislaufs (200) mit konstanter Drehzahl und daher mit konstantem Volumenstrom betrieben wird, und dass die von der Speichervorrichtung (1) aufgenommene beziehungsweise abgegebene mechanische Leistung geregelt wird, indem der Druck und damit die Dichte des Arbeitsgases (A) entsprechend verändert wird.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** der erste Turboverdichter (110) von einem ersten Turboexpander (140) und einem Elektromotor (170) angetrieben wird, wobei im ersten Turboexpander (140) Arbeitsgas (A) des Ladekreislaufs (100) entspannt wird, und dass der zweite Turboexpander (250) einen zweiten Turboverdichter (210) und einen Generator (290) antreibt, wobei im zweiten Turboverdichter (210) Arbeitsgas (A) des Entladekreislaufs (200) verdichtet wird.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 7, bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Druck des Arbeitsgases (A) im Ladekreislauf (100) und/oder im Entladekreislauf (200) geändert wird, indem Arbeitsgas (A) zwischen einem Druckbehälter (301) sowie dem Ladekreislauf (100) und/oder dem Entladekreislauf (200) ausgetauscht wird.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Arbeitsgas (A) im Ladekreislauf (100) sowie im Entladekreislauf (200) komprimiert und entspannt wird, sodass der Ladekreislauf (100) sowie der Entladekreislauf (200) je zwei Teilabschnitte umfasst, einen Hochdruckabschnitt (100a, 200a) sowie einen Niederdruckabschnitt (100b, 200b), sodass das Arbeitsgas (A) im Hochdruckabschnitt (100a, 200a) einen höheren Druck aufweist als im Niederdruckabschnitt (100b, 200b), und dass dem Druckbehälter (301) Arbeitsgas (A) zugeführt oder abgeführt wird, indem der Druckbehälter (301) entweder mit dem Hochdruckteilabschnitt (100a, 200a) oder dem Niederdruckteilabschnitt (100b, 200b) verbunden wird.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** der gemeinsame Regenerator (120) zumindest zwei und vorzugsweise drei oder vier parallel geschaltete Teilregeneratoren (120a, 120b, 120c, 120d) umfasst, welche einzeln oder in Gruppen mit dem Ladekreislauf (100) beziehungsweise dem Entladekreislauf (200) verbunden werden.
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** durch eine Stellungsveränderung der Vorleiträder (110a, 210a) des ersten Turboverdichters (110) und des zweiten Turboverdichters (210) und vorzugsweise auch des ersten Turboexpanders (140) und des zweiten Turboexpanders (250) die vom ersten Turboverdichter (110) aufgenommene mechanische Leistung und/oder die vom zweiten Turboexpander (250) abgegebene mechanische Leistung geregelt wird.

Claims

1. A power heat power storage device (1) comprising a charging circuit (100) and a discharging circuit (200) for conveying a working gas (A),
wherein the charging circuit (100) and the discharging circuit (200) comprise a common regenerator (120) which is switchably fluid conductively connected to either the charging circuit (100) or the discharging circuit (200) to form a closed circuit for supplying the working gas (A) to the regenerator (120),
wherein the charging circuit (100) comprises a first turbo compressor (110) and a first turbo expander (140), wherein the first turbo compressor (110) is driven by the first turbo expander (140) and an electric motor (170),
wherein the discharge circuit (200) comprising a second turbo expander (250) and a second turbo compressor (210), the second turbo expander (250) driving the second turbo compressor (210) and a generator (290),
characterized in that a control device (500) and a density changing device (300) are arranged and configured in such a way that they allow the pressure of the working gas (A) in the charging circuit (100) and/or in the discharging circuit (200) to be changed in a controllable manner in order to control the power which can be absorbed by the first turbo compressor (110) and the power which can be delivered by the second turbo expander (250), respectively.

2. Storage device according to claim 1, **characterized in that** the density changing device (300) can both raise and lower the pressure of the working gas (A) in the loading circuit (100) and/or in the discharging circuit (200) in a controllable manner.
- 5 3. Storage device according to claims 1 to 2, **characterized in that** the density changing device (300) comprises a pressure vessel (301) and at least a first and a second valve (302, 303), and **in that** the pressure vessel (301) is fluid conductively connectable via the valves (302, 303) to the charging circuit (100) and/or to the discharging circuit (200) in order to supply working gas (A) to the pressure vessel (301) and store it there, or in order to return working gas (A) stored in the pressure vessel (301) to the charging circuit (100) and/or to the discharging circuit (200) .
- 10 4. Storage device according to Claim 3, **characterized in that** the charging circuit (100) and the discharging circuit (200) each comprise two partial sections, a high-pressure section (100a, 200a) and a low-pressure section (100b, 200b), so that the working gas (A) has a higher pressure in the high-pressure section (100a, 200a) than in the low-pressure section (100b, 200b), and **in that** the pressure container (301) can be connected to the low-pressure section (100b) via the first valve (302), and **in that** the pressure container (301) can be connected to the high-pressure section (100a) via the second valve (303) in order to change the pressure of the working gas (A) in the pressure container (301) by switching the first and/or second valve (302, 303).
- 15 5. Storage device according to one of the preceding claims, **characterized in that** the common regenerator (120) comprises at least two and preferably three or four partial regenerators (120a, 120b, 120c, 120d) connected in parallel.
- 20 6. Storage device according to one of the preceding claims, **characterized in that** the first turbo compressor (110) and the second turbo compressor (210), and preferably also the first turbo expander (140) and the second turbo expander (250), comprise an adjustable guiding wheel (110a, 210a).
- 25 7. Method for load control of a power heat power storage device (1) comprising a charging circuit (100) with a first turbo compressor (110), wherein mechanical power is supplied to the first turbo compressor (110) for heating a working gas (A), comprising a discharge circuit (200) with a second turbo expander (250), wherein mechanical power is taken from the second turbo expander (250) for cooling the working gas (A), wherein the charging circuit (100) and the discharge circuit (200), respectively, comprise a common regenerator (120), which is alternatively connected to the charging circuit (100) or the discharging circuit (200) to form a closed circuit, so that either the working gas (A) heated in the charging circuit (100) is fed to the regenerator (120) or hot working gas (A) is removed from the regenerator (120) and fed to the discharging circuit (200), wherein the mechanical power absorbed by the first turbo compressor (110) and/or the mechanical power output by the second turbo expander (250) being controlled by changing the pressure of the working gas (A).
- 30 8. Method according to claim 7, **characterized in that** the pressure of the working gas (A) is raised in the charging circuit (100) and/or in the discharging circuit (200) in order to increase the mechanical power absorbed by the first turbo compressor (110) and/or the mechanical power delivered by the second turbo expander (250), and **in that** the pressure of the working gas (A) is lowered in order to reduce the mechanical power absorbed by the first turbo compressor (110) and/or the mechanical power delivered by the second turbo expander (250).
- 35 9. Method according to claim 7 or 8, **characterized in that** the charging circuit (100) and the discharging circuit (200) comprise a single common regenerator (120) to which the working gas (A) is supplied or from which the working gas (A) is discharged.
- 40 10. Method according to one of the claims 7 to 9, **characterized in that** the first turbo compressor (110) of the charging circuit (100) and/or the second turbo expander (250) of the discharge circuit (200) is operated at a constant rotational speed and therefore at a constant volume flow, and **in that** the mechanical power received or output by the storage device (1) is controlled by changing the pressure and thus the density of the working gas (A) accordingly.
- 45 11. Method according to one of the claims 7 to 10, **characterized in that** the first turbo compressor (110) is driven by a first turbo expander (140) and an electric motor (170), wherein working gas (A) of the charging circuit (100) being expanded in the first turbo expander (140), and **in that** the second turbo expander (250) drives a second turbo compressor (210) and a generator (290), wherein working gas (A) of the discharge circuit (200) being compressed in the second turbo compressor (210).
- 50 12. Method according to any of claims 7 to 11, **characterized in that** the pressure of the working gas (A) in the charging
- 55

circuit (100) and/or in the discharging circuit (200) is changed by exchanging working gas (A) between a pressure vessel (301) and the charging circuit (100) and/or the discharging circuit (200).

13. Method according to one of the claims 7 to 12, **characterized in that** the working gas (A) is compressed and expanded in the loading circuit (100) and in the discharging circuit (200) so that the loading circuit (100) and the discharging circuit (200) each comprise two partial sections, a high-pressure section (100a, 200a) and a low-pressure section (100b, 200b), such that the working gas (A) has a higher pressure in the high pressure portion (100a, 200a) than in the low pressure portion (100b, 200b), and that working gas (A) is supplied or discharged to the pressure vessel (301) by connecting the pressure vessel (301) to either the high pressure portion (100a, 200a) or the low pressure portion (100b, 200b).
14. Method according to one of claims 7 to 13, **characterized in that** the common regenerator (120) comprises at least two and preferably three or four partial regenerators (120a, 120b, 120c, 120d) connected in parallel, which are connected individually or in groups to the charging circuit (100) and to the discharging circuit (200) respectively.
15. Method according to one of claims 7 to 14, **characterized in that** the mechanical power consumed by the first turbo compressor (110) and/or the mechanical power output by the second turbo expander (250) is controlled by a change in position of the guiding wheels (110a, 210a) of the first turbo compressor (110) and of the second turbo compressor (210) and preferably also of the first turbo expander (140) and of the second turbo expander (250).

Revendications

1. Dispositif d'accumulation de courante-chaleur-courante (1), comprenant un circuit de charge (100) ainsi qu'un circuit de décharge (200) servant à transporter un gaz de travail (A), le circuit de charge (100) ainsi que le circuit de décharge (200) comportant un régénérateur (120) commun, lequel est relié en conduction fluïdique de manière permutable soit au circuit de charge (100), soit au circuit de décharge (200) en formant un circuit fermé en vue d'acheminer le gaz de travail (A) au régénérateur (120), le circuit de charge (100) comprenant un premier turbo-compresseur (110) ainsi qu'un premier turbodétendeur (140), le premier turbocompresseur (110) étant entraîné par le premier turbodétendeur (140) ainsi que par un moteur électrique (170), le circuit de décharge (200) comprenant un deuxième turbodétendeur (250) et un deuxième turbocompresseur (210), le deuxième turbodétendeur (250) entraînant le deuxième turbocompresseur (210) ainsi qu'un générateur (290), **caractérisé en ce qu'un** dispositif de régulation (500) ainsi qu'un dispositif de variation de la densité (300) sont disposés et configurés de telle sorte que ceux-ci permettent de modifier de manière commandable la pression du gaz de travail (A) dans le circuit de charge (100) et/ou dans le circuit de décharge (200) afin de réguler la puissance pouvant être absorbée par le premier turbocompresseur (110) ou la puissance pouvant être délivrée par le deuxième turbodétendeur (250) .
2. Dispositif d'accumulation selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** le dispositif de variation de la densité (300) peut relever et aussi abaisser de manière commandable la pression du gaz de travail (A) dans le circuit de charge (100) et/ou dans le circuit de décharge (200).
3. Dispositif d'accumulation selon l'une des revendications 1 et 2, **caractérisé en ce que** le dispositif de variation de la densité (300) comprend un récipient sous pression (301) ainsi qu'au moins une première et une deuxième vanne (302, 303), et **en ce que** le récipient sous pression (301) peut être relié en conduction fluïdique au circuit de charge (100) et/ou au circuit de décharge (200) par le biais des vannes (302, 303) en vue d'acheminer le gaz de travail (A) au récipient sous pression (301) et de l'y accumuler, ou en vue de renvoyer dans le circuit de charge (100) et/ou dans le circuit de décharge (200) le gaz de travail (A) accumulé dans le récipient sous pression (301) .
4. Dispositif d'accumulation selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** le circuit de charge (100) et le circuit de décharge (200) comportent respectivement deux portions partielles, une portion à haute pression (100a, 200a) ainsi qu'une portion à basse pression (100b, 200b), de sorte que le gaz de travail (A) présente, dans la portion à haute pression (100a, 200a), une pression supérieure à celle dans la portion à basse pression (100b, 200b), et **en ce que** le récipient sous pression (301) peut être relié à la portion à basse pression (100b) par le biais de la première vanne (302), et **en ce que** le récipient sous pression (301) peut être relié à la portion à haute pression (100a) par le biais de la deuxième vanne (303) afin de modifier la pression du gaz de travail (A) dans le récipient sous pression (301) par une commutation de la première et/ou de la deuxième vanne (302, 303).
5. Dispositif d'accumulation selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le régénérateur (120)

commun comprend au moins deux et de préférence trois ou quatre régénérateurs partiels (120a, 120b, 120c, 120d) branchés en parallèle.

- 5 6. Dispositif d'accumulation selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le premier turbocompresseur (110) et le deuxième turbocompresseur (210) et de préférence aussi le premier turbodétendeur (140) et le deuxième turbodétendeur (250) comprennent un pré-diffuseur (110a, 210a) positionnable.
- 10 7. Procédé de régulation de charge d'un dispositif d'accumulation de courant-chaleur-courant (1), comprenant un circuit de charge (100) doté d'un premier turbocompresseur (110), de la puissance mécanique étant acheminée au premier turbocompresseur (110) en vue de chauffer un gaz de travail (A), comprenant un circuit de décharge (200)
 - 15 doté d'un deuxième turbodétendeur (250), de la puissance mécanique étant prélevée du deuxième turbodétendeur (250) en vue de refroidir le gaz de travail (A), le circuit de charge (100) ou le circuit de décharge (200) comprenant un régénérateur (120) commun, lequel est relié au choix au circuit de charge (100) ou au circuit de décharge (200) en formant un circuit fermé, de sorte que soit le gaz de travail (A) chauffé dans le circuit de charge (100) est acheminé au régénérateur (120), soit du gaz de travail (A) chauffé est prélevé du régénérateur (120) et acheminé au circuit de décharge (200), la puissance mécanique absorbée par le premier turbocompresseur (110) et/ou la puissance mécanique délivrée par le deuxième turbodétendeur (250) étant régulée par une modification de la pression du gaz de travail (A).
- 20 8. Procédé selon la revendication 7, **caractérisé en ce que** la pression du gaz de travail (A) dans le circuit de charge (100) et/ou dans le circuit de décharge (200) est relevée afin d'augmenter la puissance mécanique absorbée par le premier turbocompresseur (110) et/ou la puissance mécanique délivrée par le deuxième turbodétendeur (250), et **en ce que** la pression du gaz de travail (A) est abaissée afin de réduire la puissance mécanique absorbée par
 - 25 le premier turbocompresseur (110) et/ou la puissance mécanique délivrée par le deuxième turbodétendeur (250) .
- 30 9. Procédé selon la revendication 7 ou 8, **caractérisé en ce que** le circuit de charge (100) et le circuit de décharge (200) comprennent un régénérateur (120) commun unique auquel est acheminé le gaz de travail (A) ou duquel est évacué le gaz de travail (A).
- 35 10. Procédé selon l'une des revendications 7 à 9, **caractérisé en ce que** le premier turbocompresseur (110) du circuit de charge (100) et/ou le deuxième turbodétendeur (250) du circuit de décharge (200) fonctionnent à vitesse de rotation constante et ainsi avec un débit volumique constant, et **en ce que** la puissance mécanique absorbée ou délivrée par le dispositif d'accumulation (1) est régulée en modifiant en conséquence la pression et ainsi la densité
 - 40 du gaz de travail (A).
- 45 11. Procédé selon l'une des revendications 7 à 10, **caractérisé en ce que** le premier turbocompresseur (110) est entraîné par un premier turbodétendeur (140) et un moteur électrique (170), le gaz de travail (A) du circuit de charge (100) étant détendu dans le premier turbodétendeur (140), et **en ce que** le deuxième turbodétendeur (250) entraîne un deuxième turbocompresseur (210) et un générateur (290), le gaz de travail (A) du circuit de décharge (200) étant comprimé dans le deuxième turbocompresseur (210).
- 50 12. Procédé selon l'une des revendications 7 à 11, **caractérisé en ce que** la pression du gaz de travail (A) dans le circuit de charge (100) et/ou dans le circuit de décharge (200) est modifiée par un échange du gaz de travail (A) entre un récipient sous pression (301) ainsi que le circuit de charge (100) et/ou le circuit de décharge (200).
- 55 13. Procédé selon l'une des revendications 7 à 12, **caractérisé en ce que** le gaz de travail (A) dans le circuit de charge (100) ainsi que dans le circuit de décharge (200) est comprimé et détendu, de sorte que le circuit de charge (100) et le circuit de décharge (200) comprennent chacun deux portions partielles, une portion à haute pression (100a, 200a) ainsi qu'une portion à basse pression (100b, 200b), de sorte que le gaz de travail (A) présente, dans la portion à haute pression (100a, 200a), une pression supérieure à celle dans la portion à basse pression (100b, 200b), et **en ce que** le gaz de travail (A) est acheminé au récipient sous pression (301) ou en est évacué en reliant le récipient sous pression (301) soit à la portion partielle à haute pression (100a, 200a), soit à la portion partielle à basse pression (100b, 200b).
14. Procédé selon l'une des revendications 7 à 13, **caractérisé en ce que** le régénérateur (120) commun comprend au moins deux et de préférence trois ou quatre régénérateurs partiels (120a, 120b, 120c, 120d) branchés en parallèle, lesquels sont reliés individuellement ou en groupe au circuit de charge (100) ou au circuit de décharge (200).

15. Procédé selon l'une des revendications 7 à 14, **caractérisé en ce que** la puissance mécanique absorbée par le premier turbocompresseur (110) et/ou la puissance mécanique délivrée par le deuxième turbodétendeur (250) est régulée par un changement de position du pré-diffuseur (110a, 210a) du premier turbocompresseur (110) et du deuxième turbocompresseur (210) et de préférence aussi du premier turbodétendeur (140) et du deuxième turbodétendeur (250).

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

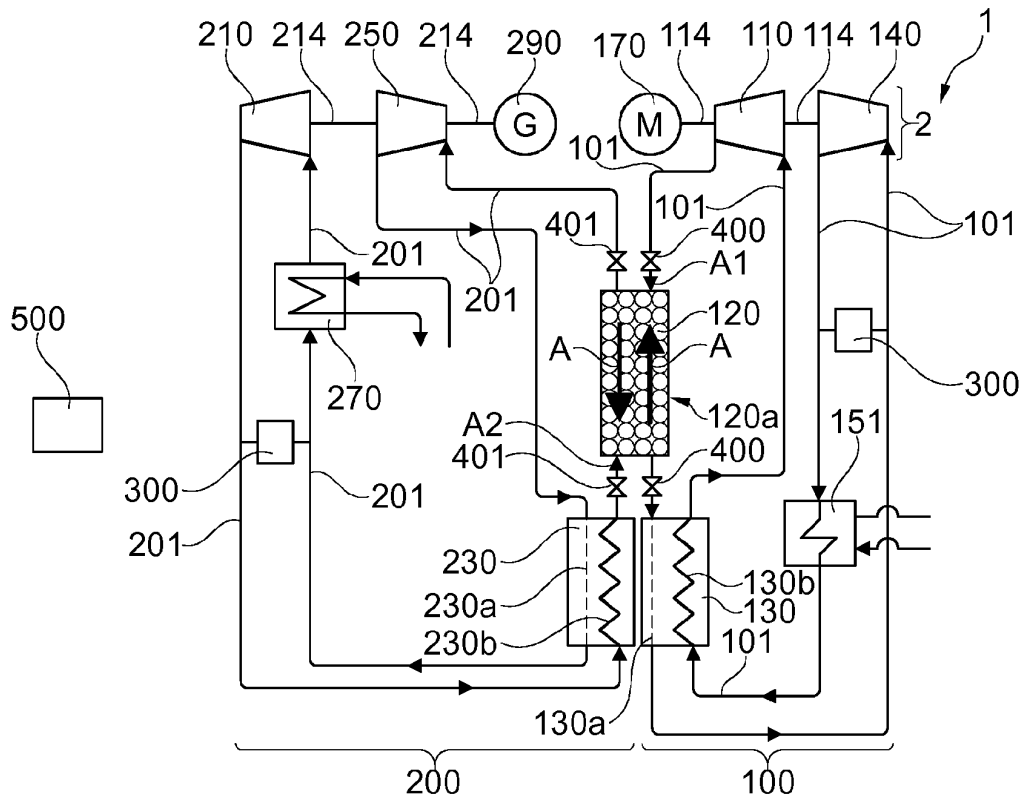


Fig. 1

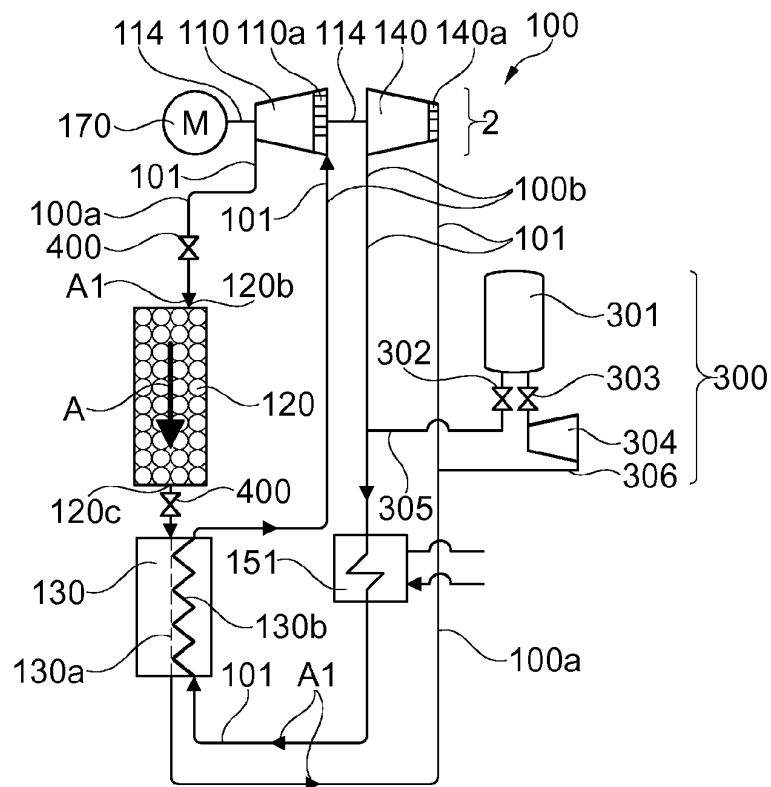


Fig. 2

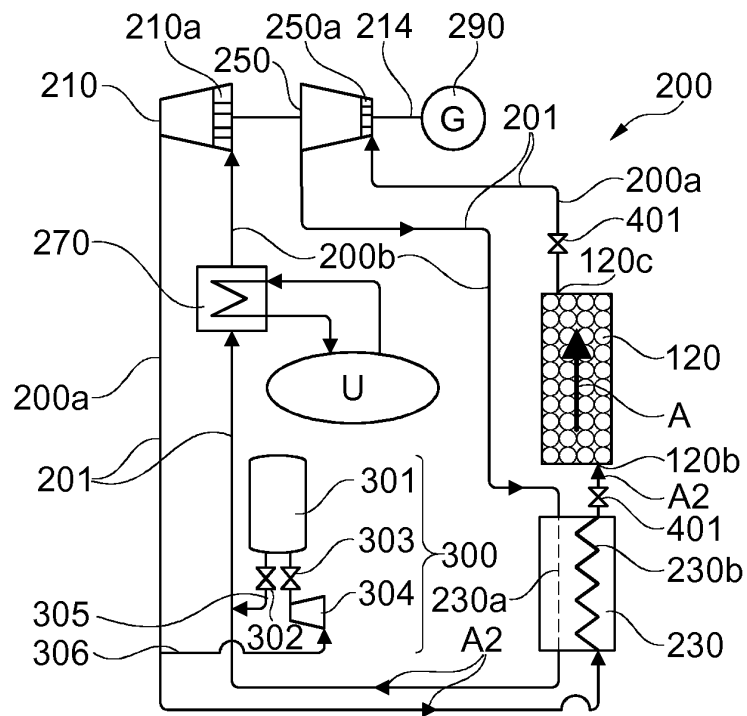


Fig. 3

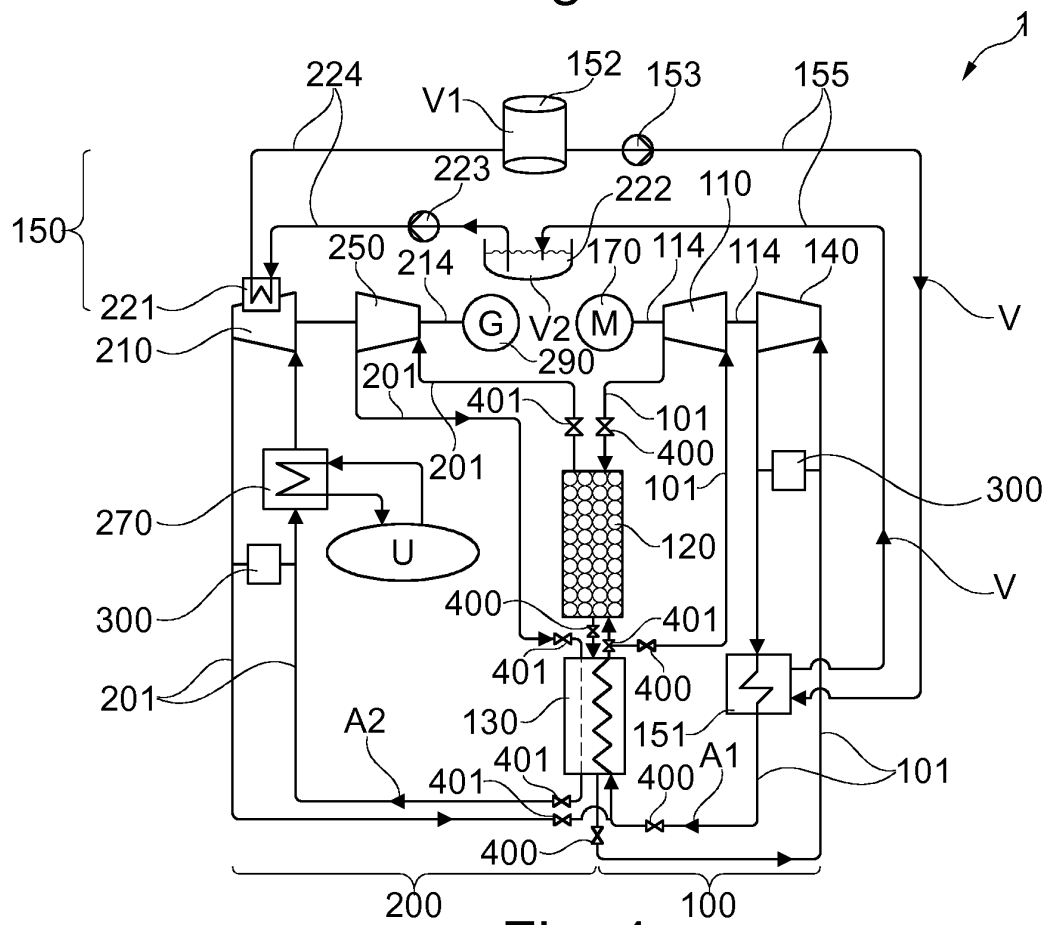


Fig. 4

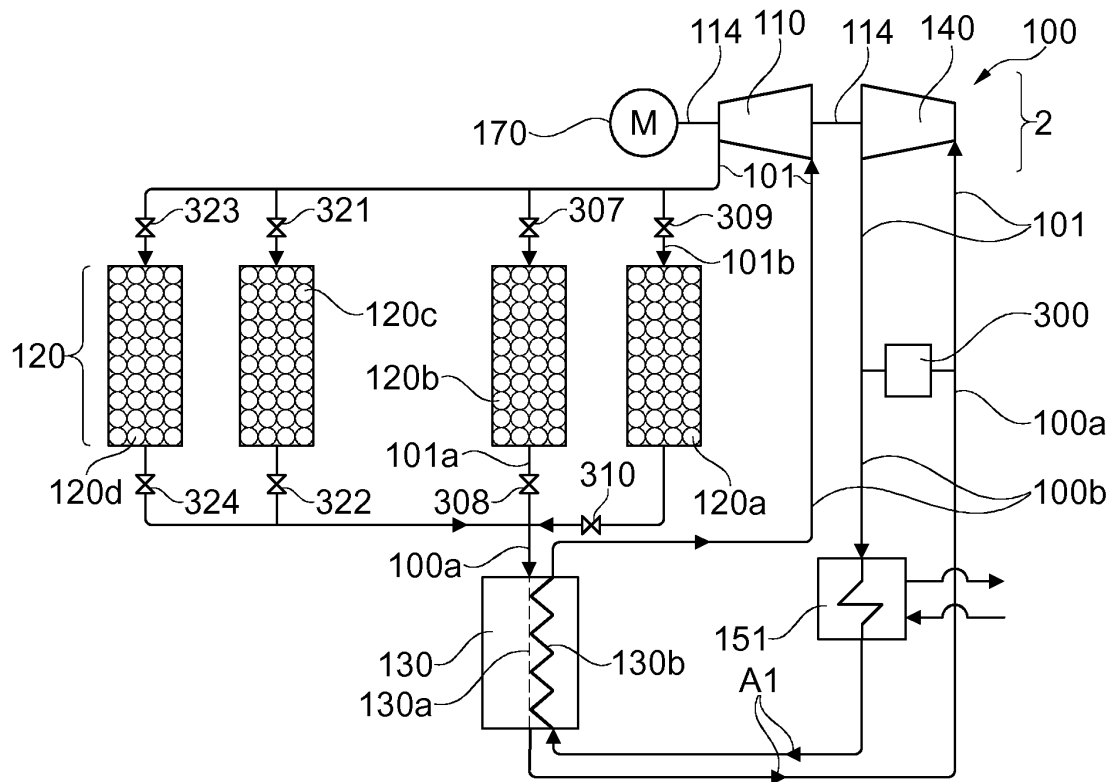


Fig. 5

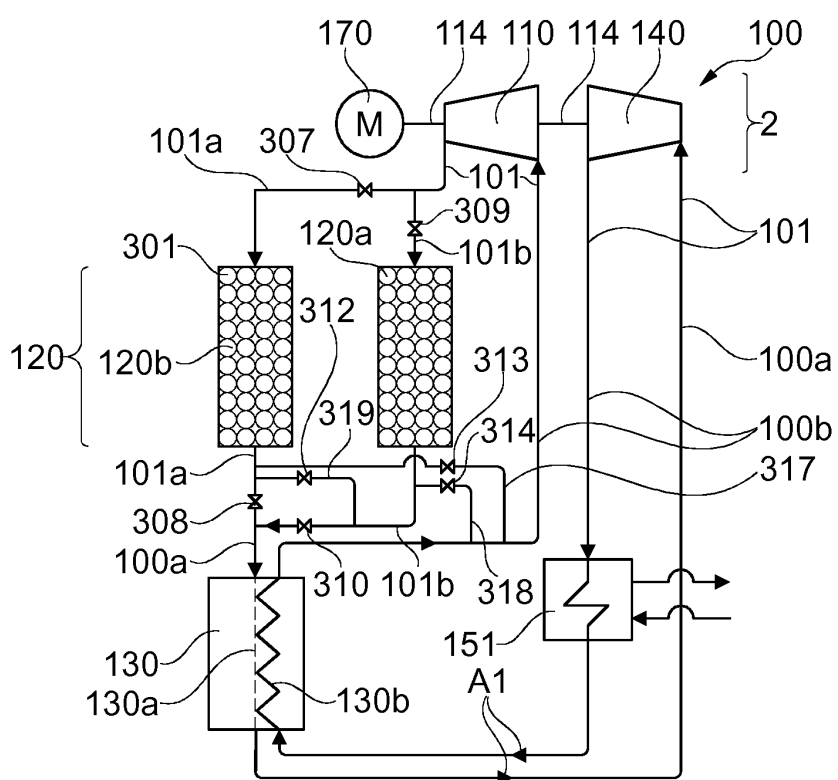


Fig. 6

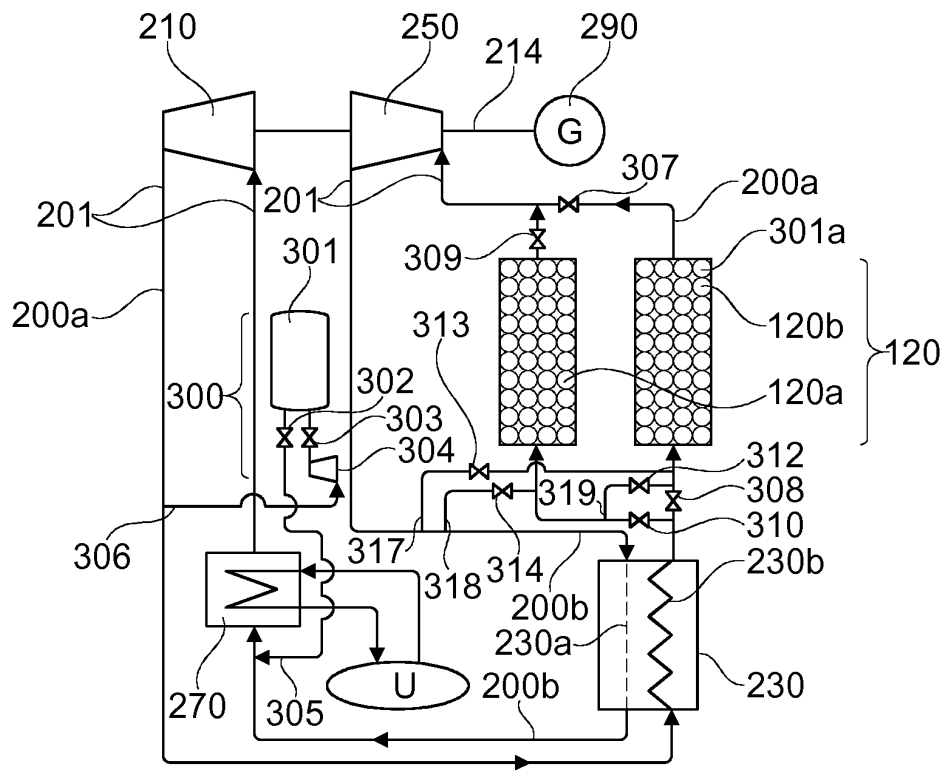


Fig. 7

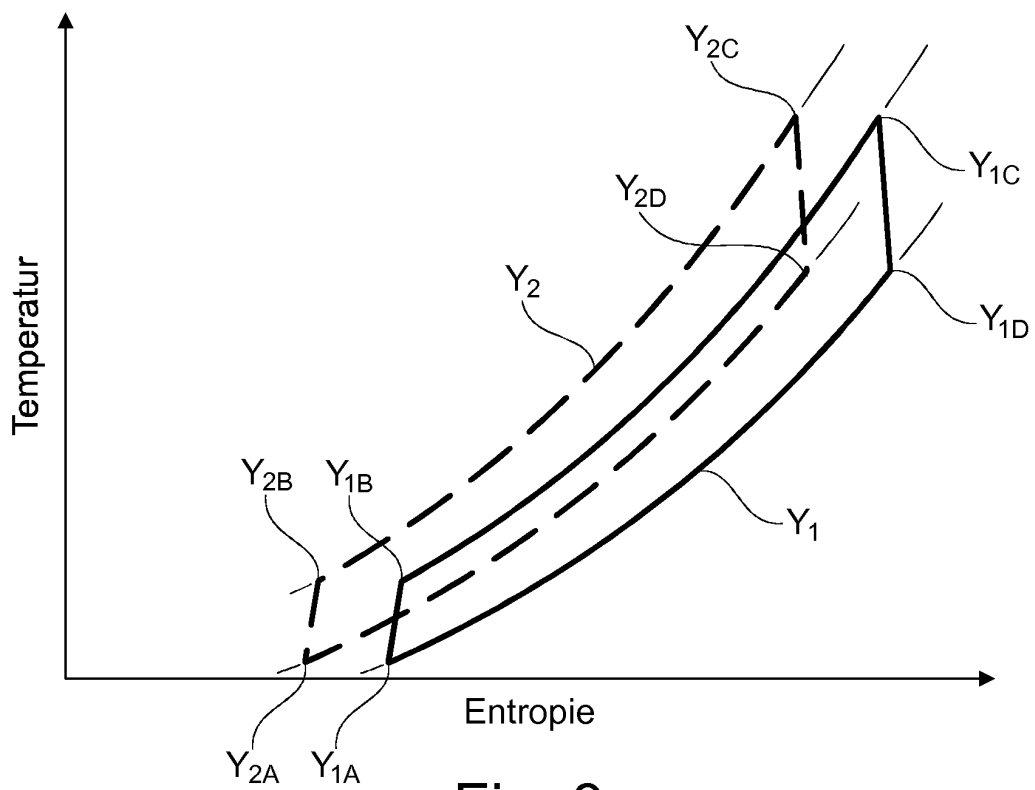


Fig. 8

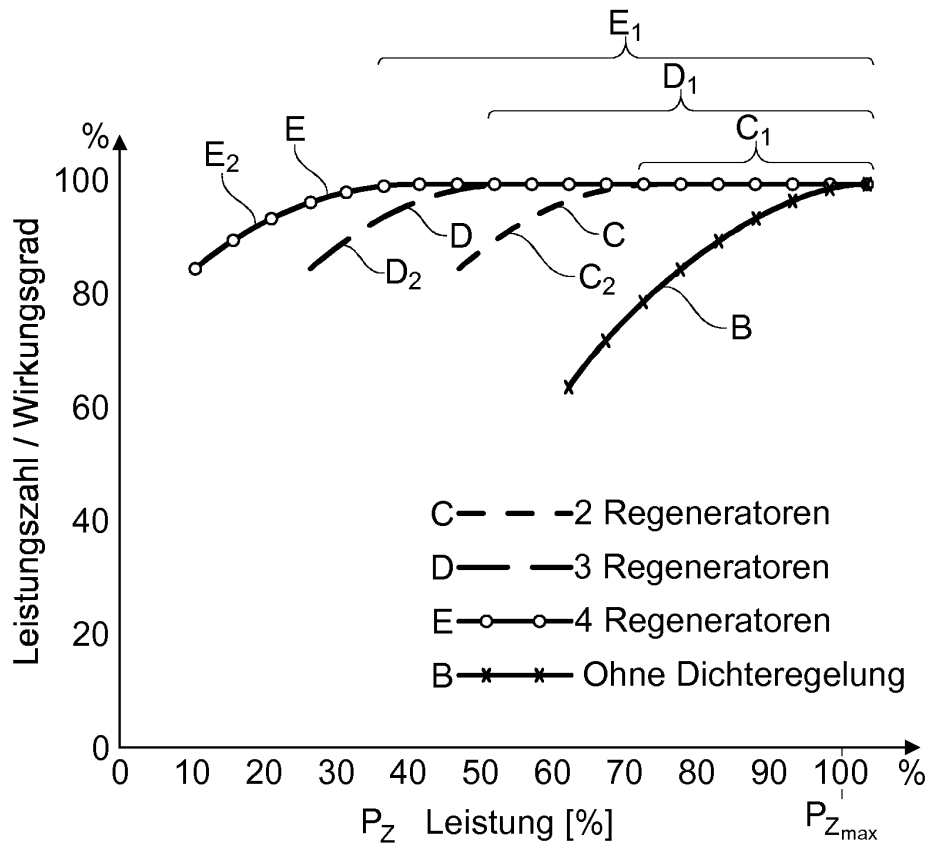


Fig. 9

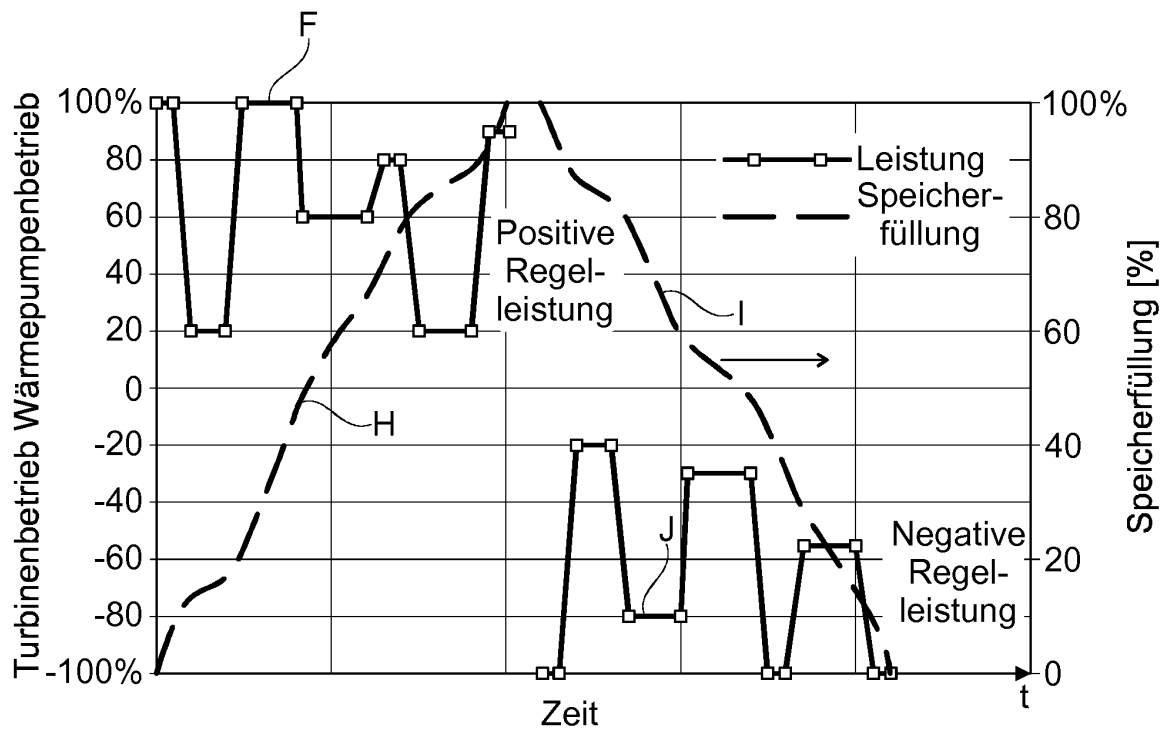


Fig. 10

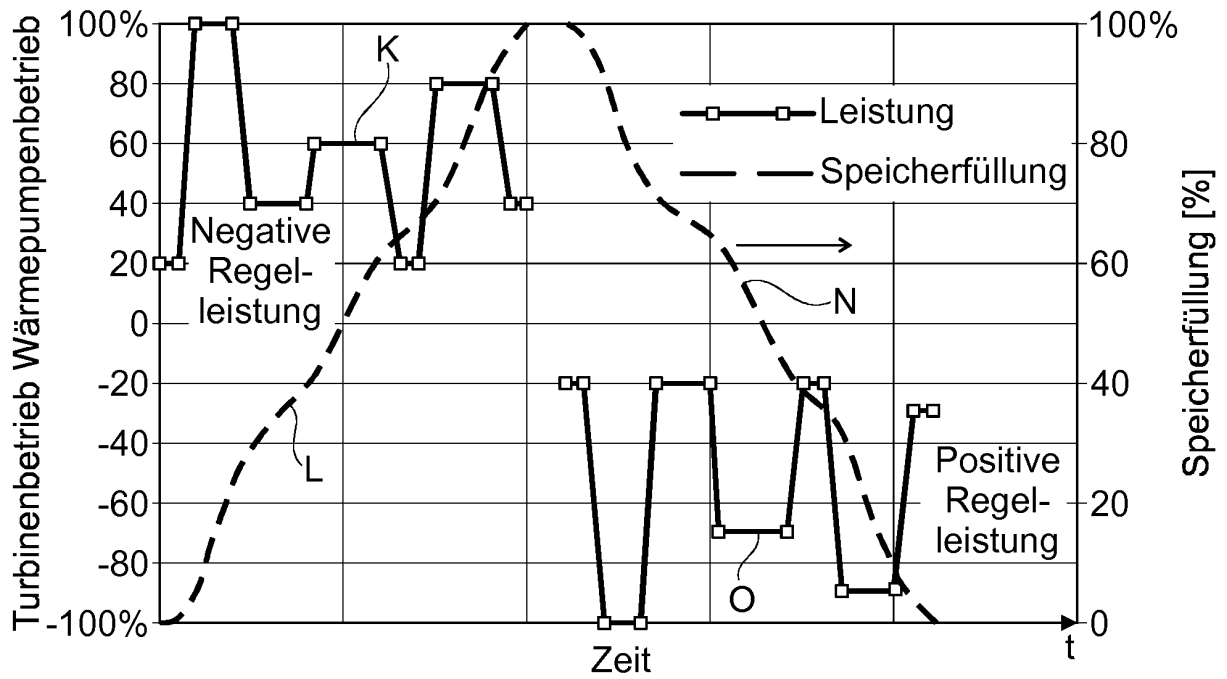


Fig. 11

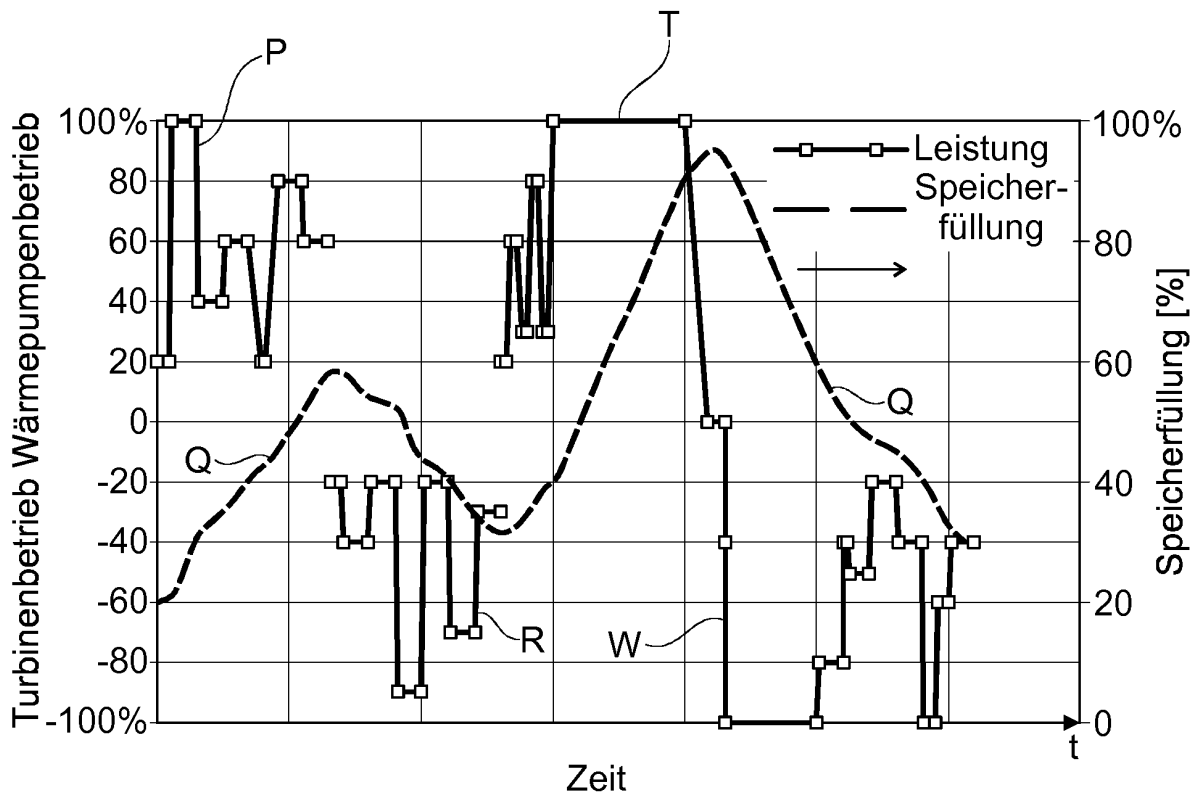


Fig. 12

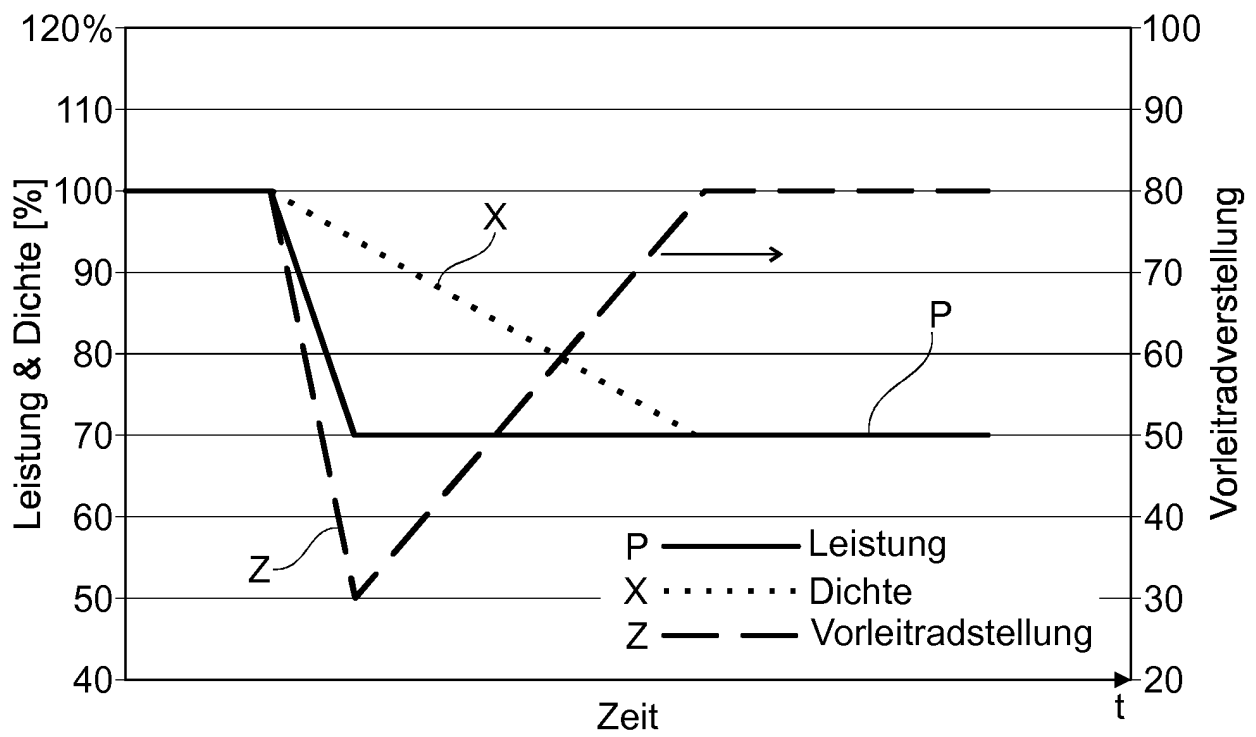


Fig. 13

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- WO 2013164562 A [0003]
- EP 2147193 B1 [0004]
- EP 2574739 A1 [0005]