

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 50464/2024
(22) Anmeldetag: 10.06.2024
(45) Veröffentlicht am: 15.06.2025

(51) Int. Cl.: **F01K 25/10** (2006.01)
F28D 13/00 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
US 2020400372 A1
CN 110360862 A
US 2014245756 A1
FR 3019640 A1

(73) Patentinhaber:
Technische Universität Wien
1040 Wien (AT)

(72) Erfinder:
Denner Stefan Dipl.-Ing. BSc
1040 Wien (AT)
Haider Markus Dr.
1040 Wien (AT)
Zhou Liesa Dipl.-Ing.
8940 Liezen (AT)

(74) Vertreter:
SONN Patentanwälte GmbH & Co KG
1010 Wien (AT)

(54) Kryogenes Energiespeichersystem und Verfahren zum Speichern von Energie

(57) Kryogenes Energiespeichersystem (1), insbesondere LAES-(Liquid Air Energy Storage)-Energiespeichersystem, aufweisend:

- eine Gaszufuhreinheit zur Zuführung eines Arbeitsfluids (2), insbesondere von Luft, im gasförmigen Zustand,
- eine Kompressoreinheit (3) zur Komprimierung des Arbeitsfluids (2) im gasförmigen Zustand,
- einen Wärmespeicher (5) zur Speicherung bei der Komprimierung des Arbeitsfluids (2) im gasförmigen Zustand entstehender Wärme,
- eine Kühl- und Verflüssigungseinheit (7) zur Abkühlung und Verflüssigung des Arbeitsfluids (2),
- einen Kältespeicher (8) zur Abgabe von Kälte an das Arbeitsfluid (2) bei der Abkühlung und Verflüssigung,
- einen kryogenen Speichertank (10) zur Speicherung des verflüssigten Arbeitsfluids (2),
- eine Verdampfungseinheit (12) zur Verdampfung von aus dem kryogenen Speichertank (10) entladenen Arbeitsfluid (2),

h) eine Energierückgewinnungseinheit (14), vorzugsweise mit zumindest einer Expansionsturbineneinheit (15), zur Rückgewinnung von Energie aus dem Arbeitsfluid (2),

wobei der Wärmespeicher (5) und/oder der Kältespeicher (8) einen Wirbelschichtwärmetauscher (21, 22, 23) mit Inventar aus Feststoffpartikeln aufweist.

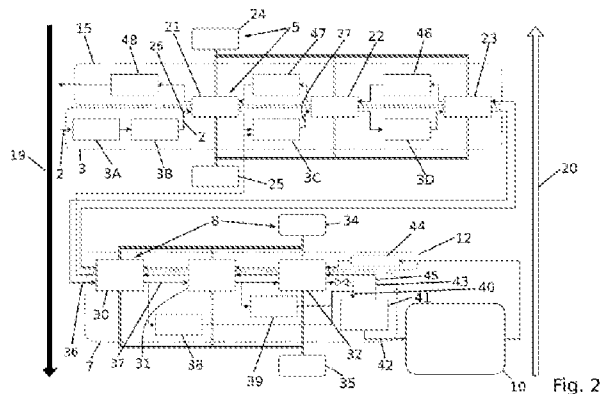


Fig. 2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein kryogenes Energiespeichersystem, insbesondere LAES-(Liquid Air Energy Storage)-Energiespeichersystem, aufweisend:

- a) eine Gaszufuhreinheit zur Zuführung eines Arbeitsfluids, insbesondere von Luft, im gasförmigen Zustand,
- b) eine Kompressoreinheit zur Komprimierung des Arbeitsfluids im gasförmigen Zustand,
- c) einen Wärmespeicher zur Speicherung von bei der Komprimierung des Arbeitsfluids im gasförmigen Zustand entstehender Wärme,
- d) eine Kühl- und Verflüssigungseinheit zur Abkühlung und Verflüssigung des Arbeitsfluids,
- e) einen Kältespeicher zur Abgabe von Kälte an das Arbeitsfluid bei der Abkühlung und Verflüssigung,
- f) einen kryogenen Speichertank zur Speicherung des verflüssigten Arbeitsfluids,
- g) eine Energierückgewinnungseinheit, vorzugsweise mit zumindest einer Expansionsturbineneinheit, zur Rückgewinnung von Energie aus dem Arbeitsfluid.

[0002] Weiters betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Speichern von Energie mittels eines kryogenen Energiespeichersystems, insbesondere LAES-(Liquid Air Energy Storage)-Energiespeichersystems.

[0003] Der allgemeine Stand der Technik ist durch US 2020400372 A1, CN 110360862 A, US 2014245756 A1 und FR 3019640 A1 gebildet.

[0004] Liquid Air Energy Storage (LAES) ist eine Technologie zur Speicherung von Energie, die mit der Luftverflüssigung arbeitet. Der Prozess nutzt überschüssige elektrische Energie, um Luft auf sehr niedrige Temperaturen abzukühlen, bis die Luft flüssig wird. Diese verflüssigte Luft wird in isolierten Behältern bei niedrigem Druck gespeichert. Wenn später die gespeicherte Energie benötigt wird, wird die flüssige Luft komprimiert, erwärmt und expandiert. Diese Expansion treibt eine Turbine an, um Strom zu erzeugen.

[0005] Der Prozess der Liquid Air Energy Storage kann in drei Hauptphasen unterteilt werden.

[0006] Luftverflüssigung: Überschüssige Energie wird verwendet, um Luft auf Temperaturen von beispielsweise -160° Celsius abzukühlen, wodurch sie zu einer flüssigen Form kondensiert. Dieser Vorgang erfolgt typischerweise in Zeiten, in denen das Angebot an überschüssiger elektrischer Energie die Nachfrage übersteigt.

[0007] Speicherung: Die flüssige Luft wird in großen, isolierten Tanks gespeichert. Diese Tanks sind so konzipiert, dass sie die flüssige Luft für längere Zeiträume ohne signifikanten Energieverlust speichern können. Die Fähigkeit, Energie in dieser Form zu speichern, ermöglicht es, Energie über Stunden, Tage, Wochen oder sogar Monate zu speichern, bis sie benötigt wird.

[0008] Energierückgewinnung: Wenn die Energie benötigt wird, wird die flüssige Luft komprimiert, erwärmt, verdampft und überhitzt. Die erwärmte gasförmige Luft treibt eine Turbine an, die mit einem Generator verbunden ist, um Elektrizität zu erzeugen.

[0009] Ein wesentlicher Vorteil der LAES-Technologie ist ihre Fähigkeit, große Energiemengen auf kleinem Volumen über längere Zeiträume zu speichern, was sie zu einer potenziell wertvollen Ergänzung für erneuerbare Energiesysteme macht. LAES kann dazu beitragen, die Variabilität erneuerbarer Energiequellen auszugleichen und die Stabilität und Zuverlässigkeit des Stromnetzes zu verbessern. Darüber hinaus ist LAES umweltfreundlich, da als Speichermedium Luft genutzt wird, ein unbegrenzt vorhandenes und nicht-toxisches Material.

[0010] Aus EP 1 989 400 B1 sind solche kryogene Energiespeicher (CES - „Cryogen Energy Storage“) bekannt. Bei diesem kryogenen Energiespeicher werden ein erster und ein zweiter Wärmetauscher eingesetzt. Aus einer gasförmigen Einspeisung wird ein Kryogen erzeugt und

gespeichert. Beim Ausspeichern wird das Kryogen unter Druck gesetzt und mit Hilfe von Wärme aus der gasförmigen Einspeisung im zweiten Wärmetauscher erwärmt. Das erwärmte Druckkryogen wird im ersten Wärmetauscher mithilfe von Wärme aus der gasförmigen Einspeisung überhitzt. Anschließend wird das überhitzte Kryogen in einer Turbine expandiert, um die Turbine anzutreiben. Ein Teil der im Kryogen enthaltenen Kälteenergie wird mit dem ersten und dem zweiten Wärmetauscher zum Herunterkühlen der gasförmigen Einspeisung zurückgewonnen. Somit kann die Produktion des Kryogens gesteigert werden.

[0011] Die EP 2 603 761 B1 beschreibt weiters thermische Energiespeicher, die bei solchen LAES-Systemen verwendet werden können.

Darin wird beschrieben, dass eine wesentliche Einschränkung für die Effizienz solcher kryogener Energiespeichersysteme die Menge an kalter Energie ist, die nach der Expansion in der Prozessluft verbleibt, die aus der Expansionsturbine austritt. Die Kombination aus kryogener Energiespeicherung und thermischer Energiespeicherung bietet eine Möglichkeit, die Stromversorgung an Schwankungen von Angebot und Nachfrage anzupassen. Insbesondere kann ein Wärmespeicher mit einem kryogenen Energiespeichersystem verwendet werden, um die bei der Stromerzeugung des kryogenen Energiespeichers freigesetzte Kälteenergie zurückzugewinnen und zu speichern und die Kälteenergie freizusetzen, um die Energiekosten für die Herstellung des kryogenen Fluids beim Wiederaufladen der kryogenen Energie zu senken. Bei diesem Stand der Technik wird ein flüssiges oder gasförmiges Wärmeübertragungsfluid (Heat Transfer Fluid - HTF) verwendet, mit welchem eine thermische Masse erwärmt oder gekühlt wird. Durch eine Anordnung von Rohr-Leitungen wird das HTF über die thermische Masse geführt, um thermische Energie zwischen dem HTF und der thermischen Masse auszutauschen. Die Speichermassen können Thermozellen aufweisen, die ein Bett aus festen Partikeln aufweisen können, durch welches das HTF fließen kann.

[0012] Nachteilig ist jedoch, dass bei der Speicherung von Kälte zuerst der Wärmeaustausch zwischen der flüssigen Luft und dem Wärmeübertragungsfluid und anschließend zwischen dem Wärmeübertragungsfluid und dem Speichermedium durchgeführt werden muss. Dadurch entstehen Exergieverluste, d.h. eine Abwertung der Energiequalität).

[0013] Demgegenüber ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, zumindest einzelne Nachteile des Standes der Technik zu beseitigen oder zumindest zu lindern. Vorzugsweise setzt sich die Erfindung zum Ziel, ein kryogenes Energiespeichersystem, insbesondere LAES-(Liquid Air Energy Storage)-Energiespeichersystem, zur Verfügung zu stellen, mit welchem Exergieverluste der thermischen Speicher minimiert werden.

[0014] Gelöst wird diese Aufgabe durch ein kryogenes Energiespeichersystem nach Anspruch 1 bzw. Anspruch 7 und ein Verfahren nach Anspruch 17.

[0015] Bevorzugte Ausführungsformen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

[0016] Bei einer ersten erfindungsgemäßen Ausführung weist der Wärmespeicher auf:

einen Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher mit einem Inventar aus Feststoffpartikeln;

eine Wärmespeicher-Fluidisierungseinrichtung zum Einleiten eines Fluidisierungsgases in den Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher, um das Inventar aus Feststoffpartikeln in einen fluidisierten Zustand zu versetzen;

einen ersten Wärmespeicher-Speicherbehälter für das Inventar aus Feststoffpartikeln;

einen zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter für das Inventar aus Feststoffpartikeln, wobei der zweite Wärmespeicher-Speicherbehälter über den Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher mit dem ersten Wärmespeicher-Speicherbehälter verbunden ist;

eine das Arbeitsfluid im gasförmigen, flüssigen oder überkritischen Zustand führende Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung, welche in den Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher geführt ist, so dass Wärme zwischen dem Arbeitsfluid im gasförmigen Zustand und den Feststoffpartikeln im fluidisierten Zustand übertragen wird.

Beim Einspeichern kann innerhalb des Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers Wärme vom Arbeitsfluid, welches insbesondere Luft ist, auf fluidisierte Feststoffpartikel übertragen werden, welche zudem als Speichermasse zum Speichern der Wärme des Arbeitsfluids genutzt werden. Somit nehmen die während der Einspeicher-, der Speicher- und der Ausspeicherphase stets im festen, d.h. nicht im gasförmigen oder flüssigen Aggregatzustand vorliegenden, Feststoffpartikel die Wärme vom Arbeitsfluid auf, wobei dieselben Feststoffpartikel die Wärme des Arbeitsfluids während der Speicherphase speichern. Die Wärme wird direkt, d.h. ohne Zwischenmedium, vom Arbeitsfluid auf die fluidisierten Feststoffpartikel übertragen. Die Wärmeübertragung wird durch das Phänomen der Partikel-Konvektion dominiert. Dabei stehen die Feststoffpartikel nicht im Kontakt mit dem Arbeitsfluid, sondern der Wärmeaustausch erfolgt über die Wandung der Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung, welche in den Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher geführt ist. Somit kann beim Einspeichern Exergie in Form von Wärme mit den Feststoffpartikeln gespeichert werden. Dadurch werden die Feststoffpartikel erhitzt. Danach steht die in den Feststoffpartikeln gespeicherte thermische Energie für den Ausspeicherprozess zur Verfügung. Beim Ausspeichern kann Wärme von den Feststoffpartikeln zum Arbeitsmedium fließen. Dadurch kühlen sich die Feststoffpartikel ab. Vorteilhafterweise kann der Einspeicherprozess mit Hilfe des Feststoff-Wirbelschichtwärmetauschers wesentlich effizienter als beim Stand der Technik durchgeführt werden, da erfindungsgemäß auf ein vom Arbeitsfluid und von der Speichermasse gesondertes Wärmeübertragungsfluid verzichtet wird. Vorteilhafterweise können mit der Erfindung Exergieverluste minimiert werden. Beim Stand der Technik wurde die Wärme vom Arbeitsfluid zunächst auf das als Zwischenmedium fungierende Wärmeträgerfluid und erst dann vom Wärmeträgerfluid auf das feste Speichermedium übertragen. Dabei treten deutlich höhere Exergieverluste auf, welche darauf zurückzuführen sind, dass einerseits eine Temperaturdifferenz zwischen dem Arbeitsfluid und dem Zwischenmedium und andererseits eine Temperaturdifferenz zwischen dem Zwischenmedium und dem Speichermedium vorliegt. Der Einsatz von Feststoffpartikeln als Speichermedium ermöglicht es, Wärme bei höheren Temperaturen zu speichern als mit andersartigen Speichermedien, beispielsweise mit Thermoöl, welches in der maximalen Temperatur beschränkt ist. Andererseits wurde im Stand der Technik auch Wasser als Speichermedium für den Wärmespeicher vorgeschlagen, welches jedoch viele Nachteile, insbesondere hohen Druck bei hohen Temperaturen, mit sich bringt. Die Feststoffpartikel hingegen minimieren einerseits die Exergieverluste bei der Wärmeübertragung im fluidisierten Zustand und weisen andererseits im nicht-fluidisierten Zustand eine geringe Wärmeleitfähigkeit auf, wodurch die Verluste während der Speicherphase reduziert werden. Vorteilhaft ist weiters, dass die Feststoffpartikel in der Speicherphase keine Strömungen ausbilden, welche bei flüssigen oder gasförmigen Speichermedien auftreten können.

[0017] Die Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung befindet sich im Inneren des Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers und ermöglicht einen Wärmeaustausch zwischen dem in der Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung befindlichen Arbeitsfluid und den im Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher befindlichen Feststoffpartikeln.

[0018] Bei einer zweiten erfindungsgemäßen Ausführung weist der Kältespeicher auf:

zumindest einen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher mit einem Inventar aus Feststoffpartikeln;

zumindest eine Kältespeicher-Fluidisierungseinrichtung zum Einleiten eines Fluidisierungsgases in den Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher, um das Inventar aus Feststoffpartikeln in einen fluidisierten Zustand zu versetzen;

zumindest einen ersten Kältespeicher-Speicherbehälter für das Inventar aus Feststoffpartikeln;

zumindest einen zweiten Kältespeicher-Speicherbehälter für das Inventar aus Feststoffpartikeln, wobei der zweite Kältespeicher-Speicherbehälter über den Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher mit dem ersten Kältespeicher-Speicherbehälter verbunden ist;

zumindest eine das Arbeitsfluid führende Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung, welche in den Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher geführt ist, so dass Wärme zwischen dem Arbeits-

fluid und den Feststoffpartikeln im fluidisierten Zustand übertragen wird.

[0019] Mit dem Kältespeicher kann beim Ausspeichern Exergie in Form von Kälte gespeichert werden, die beim Einspeichern für die Abkühlung des Arbeitsfluids genutzt werden kann. Beim Ausspeichern kann innerhalb des Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers Kälte vom Arbeitsfluid, welches insbesondere Luft ist, auf fluidisierte Feststoffpartikel übertragen, welche zudem als Speichermasse zum Speichern der Kälte des Arbeitsfluids, insbesondere zur Nutzung bei der nächsten Einspeicherphase des kryogenen Energiespeichersystems, genutzt werden. Somit nehmen die Feststoffpartikel die Kälte vom Arbeitsfluid auf, wobei dieselben Feststoffpartikel die Kälte des Arbeitsfluids speichern. Die Kälte wird direkt, d.h. ohne Zwischenmedium, vom Arbeitsfluid auf die fluidisierten Feststoffpartikel übertragen. Dabei stehen die Feststoffpartikel jedoch nicht im Kontakt mit dem Arbeitsfluid, sondern der Wärmeaustausch erfolgt über die Wandung der Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung, welche in den Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher geführt ist. Auch hier erfolgt die Wärmeübertragung zwischen den Partikeln und der Wandung hauptsächlich durch Partikelkonvektion. Danach steht die in den Feststoffpartikeln gespeicherte Kälte für den Einspeicherprozess zur Verfügung. Vorteilhafterweise kann der Einspeicherprozess mit Hilfe des Feststoff-Wirbelschichtwärmetauschers wesentlich effizienter als beim Stand der Technik durchgeführt werden, da erfindungsgemäß auf ein vom Arbeitsfluid und von der Speichermasse gesondertes Wärmeübertragungsfluid verzichtet wird. Wie oben in Zusammenhang mit dem Wärmespeicher geschildert, können auch beim Kältespeicher mit dem Feststoff-Wirbelschichtwärmetauscher Exergieverluste minimiert werden. Mit den Feststoffpartikeln können sehr niedrige Speichertemperaturen abgedeckt werden. Außerdem werden Verluste während der Speicherphase gegenüber flüssigen oder gasförmigen Speichermedien reduziert. Schließlich wird ein sehr sicherer Kältespeicher geschaffen.

[0020] Bei einer bevorzugten Ausführung als LAES-(Liquid Air Energy Storage)- Energiespeichersystem können einige im Stand der Technik an sich bereits bekannte Schritte ausgeführt werden. Die Luft kann bei Umgebungsdruck und Umgebungstemperatur angesaugt, gereinigt und anschließend in einer Kompressoreinheit unter Druck gesetzt werden. Dadurch steigt die Temperatur der Luft an. Dann wird die verdichtete Luft gekühlt (vorzugsweise auf -160°C oder weniger), wobei die von der Luft abgegebene Wärme gespeichert werden kann. Die gekühlte Luft kann mit einem Drosselventil wieder entspannt werden, wobei die Temperatur noch weiter sinkt. Nun kann die flüssige Luft in einem Speichertank gespeichert werden. Bei der Entspannung der gekühlten Luft entsteht, neben der flüssigen Luft, auch kalte gasförmige Luft, welche vor dem Speichern abgeschieden wird. Diese kalte, gasförmige Luft kann im Gegenstrom zur zu verflüssigenden Luft zurückgeführt werden. Dabei kann diese kalte gasförmige Luft, zusätzlich zu den Wärme- und Kältespeichern, die zu verflüssigende Luft kühlen. Um die in der flüssigen Luft gespeicherte Energie beim Ausspeichern wieder in mechanische bzw. elektrische Energie umzuwandeln, kann die Luft zuerst von einer Kryopumpe auf einen hohen Druck gebracht werden. Anschließend kann die Luft verdampft und überhitzt werden. Dabei kann die bei der Verdichtung gespeicherte Wärme genutzt werden. Das erhitzte Hochdruckgas kann in einer Turbine entspannt werden, um in Verbindung mit einem Generator elektrische Energie bereitzustellen.

[0021] Bei einer bevorzugten Ausführungsform weist das kryogene Energiespeichersystem eine Kompressoreinheit auf, die zumindest eine erste Kompressorstufe und eine zweite Kompressorstufe zur stufenweisen Komprimierung des Arbeitsfluids im gasförmigen Zustand aufweist. Die Kompressoreinheit wird eingesetzt, um das Arbeitsfluid im gasförmigen Zustand zu verdichten und somit den Druck des Arbeitsfluids zu erhöhen.

[0022] Bei einer bevorzugten Ausführungsform umfasst die zumindest eine Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung eine mit der ersten Kompressorstufe verbundene erste Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung und eine mit der zweiten Kompressorstufe verbundene zweite Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung jeweils für das Arbeitsfluid im gasförmigen Zustand.

[0023] Bei einer bevorzugten Ausführungsform umfasst der zumindest eine Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher einen ersten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher und einen zweiten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher, wobei die erste Wärmespeicher-Wär-

meaustauschleitung für das Arbeitsmedium im gasförmigen Zustand in den ersten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher und die zweite Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung für das Arbeitsmedium im gasförmigen Zustand in den zweiten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher geführt ist. In dem jeweiligen Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher findet über die Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung ein Wärmeaustausch zwischen dem Arbeitsfluid und den Feststoffpartikeln statt.

[0024] Bei einer bevorzugten Ausführungsform sind der erste Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher und der zweite Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher des Wärmespeichers mit demselben ersten Wärmespeicher-Speicherbehälter und/oder mit demselben zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter für das Inventar aus Feststoffpartikeln verbunden.

[0025] Bei einer bevorzugten Ausführungsform sind die erste Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung und die zweite Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung für das Arbeitsfluid im gasförmigen Zustand in den denselben Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher geführt. Bei dieser Ausführungsform kann ein entsprechender Temperaturverlauf entlang des Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers vorgesehen sein.

[0026] Bei einer bevorzugten Ausführungsform umfasst der zumindest eine Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher einen ersten und einen zweiten Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher, wobei die zumindest eine Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung eine in den ersten Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher geführte erste Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung und eine in den zweiten Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher geführte zweite Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung umfasst. Der erste und zweite Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher sind in Serie geschaltet. Über die erste und zweite Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung findet ein Wärmeaustausch zwischen dem Arbeitsfluid und den Feststoffpartikeln statt.

[0027] Bei einer bevorzugten Ausführungsform weist die Kühl- und Verflüssigungseinheit zumindest eine erste und eine zweite Kryo-Expansionsstufe auf. Die erste und zweite Kryo-Expansionsstufe sind dazu eingerichtet, das bereits gekühlte Arbeitsfluid zu entspannen und dadurch die Temperatur weiter zu senken. Diese Expansionsstufen haben den Zweck, das Konzept gleichermaßen für den Linde-Hampton, Claude- und Kapitza-Prozess zugänglich zu machen. Die Expansionsstufen erlauben, die Wärmekapazitätsströme des nach der Luftverflüssigung im Gegenstrom zur Umgebung rückgeführten gasförmigen Luftmassenstroms so zu erhöhen, dass eine globale Energieoptimierung realisiert werden kann.

[0028] Bei einer bevorzugten Ausführungsform ist eine Gas-Flüssig-Separationseinheit vorgesehen, welche einen ersten Ausgang zur Zuführung von Arbeitsfluid im flüssigen Zustand in den kryogenen Speichertank und einen zweiten Ausgang zur Rückführung des Arbeitsfluids im gasförmigen Zustand in die Gegenstrom-Wirbelschichtwärmetauscher. Die Gegenstrom-Rückführung von gasförmigem Arbeitsfluid unterstützt die Luftverflüssigungsprozesse von Linde-Hampton, Claude und Kapitza.

[0029] Bei einer bevorzugten Ausführungsform ist der kryogene Speichertank mit einer Kryo-Pumpe verbunden, so dass beim Ausspeichern aus dem kryogenen Speichertank entladenes Arbeitsfluid mit der Kryo-Pumpe auf einen überkritischen Druck überführbar ist. Der Druck des ausgespeicherten Arbeitsfluid wird mit der Kryo-Pumpe stark erhöht.

[0030] Bei einer bevorzugten Ausführungsform ist die Kryo-Pumpe mit dem Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher verbunden, so dass beim Ausspeichern das vom kryogenen Speichertank entladene und mit der Kryo-Pumpe auf überkritischen Druck gebrachte Arbeitsfluid durch Wärmeaustausch mit den Feststoffpartikeln im fluidisierten Zustand im Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher erwärmt wird.

[0031] Bei einer bevorzugten Ausführungsform ist der Kältespeicher mit dem Wärmespeicher verbunden, so dass beim Ausspeichern das vom kryogenen Speichertank entladene, mit der Kryo-Pumpe auf überkritischen Druck gebrachte und durch Wärmeaustausch im Kältespeicher erwärmte Arbeitsfluid mit dem Wärmespeicher weiter erhitzt wird.

[0032] Bei einer bevorzugten Ausführungsform weist die Expansionsturbineneinheit zumindest

eine erste Turbinenstufe und eine zweite Turbinenstufe auf. Zwischen den Turbinenstufen kann das Arbeitsfluid durch eine Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung in einem Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher geleitet werden.

[0033] Bei einer bevorzugten Ausführungsform weist die Kältespeicher-Fluidisierungseinrichtung einen geschlossenen Fluidisierungskreislauf für das Fluidisierungsgas auf. Durch die niedrigen Temperaturen beim Kältespeicher könnte ein offener Fluidisierungskreislauf mit Umgebungsluft als Fluidisierungsgas nicht verwendet werden, da es durch die dort enthaltene Luftfeuchtigkeit zu Eisbildung in der Anlage kommen würde.

[0034] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zum Speichern von Energie mittels eines kryogenen Energiespeichersystems, insbesondere LAES-(Liquid Air Energy Storage)-Energiespeichersystems, werden zumindest die folgenden Schritte durchgeführt:

- a) Zuführung eines Arbeitsfluids, insbesondere von Luft, im gasförmigen Zustand,
- b) Komprimierung des Arbeitsfluids im gasförmigen Zustand,
- c) Speicherung bei der Komprimierung des Arbeitsfluids im gasförmigen Zustand entstehender Wärme, d.h. thermischer Energie höherer Temperatur, in einen Wärmespeicher,
- d) Abkühlung und Verflüssigung des Arbeitsfluids,
- e) Abgabe von Kälte, d.h. thermischer Energie niedrigerer Temperatur, von einem Kältespeicher an das Arbeitsfluid bei der Abkühlung und Verflüssigung des Arbeitsfluids,
- f) Speicherung des verflüssigten Arbeitsfluids in einem kryogenen Speichertank,

wobei die Speicherung bei der Komprimierung des Arbeitsfluids im gasförmigen Zustand entstehender Wärme in dem Wärmespeicher (Schritt c)) umfasst:

- c1) Einleiten eines ersten Fluidisierungsgases in einen Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher, um ein darin enthaltenes Inventar aus Feststoffpartikeln in einen fluidisierten Zustand zu versetzen;
- c2) Fördern von Feststoffpartikeln von einem ersten Wärmespeicher-Speicherbehälter über den Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher in einen zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter;
- c3) Durchleiten des Arbeitsfluids im gasförmigen Zustand durch eine Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung innerhalb des Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers und
- c4) Wärmeaustausch zwischen dem Arbeitsfluid und den im Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher befindlichen Feststoffpartikeln im fluidisierten Zustand

und/oder dass

die Abgabe von Kälte von dem Kältespeicher an das Arbeitsfluid bei der Abkühlung und Verflüssigung des Arbeitsfluids (Schritt e)) umfasst:

- e1) Einleiten eines zweiten Fluidisierungsgases in einen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher, um ein darin enthaltenes Inventar aus Feststoffpartikeln in einen fluidisierten Zustand zu versetzen;
- e2) Fördern von Feststoffpartikeln von einem ersten Kältespeicher-Speicherbehälter über den Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher in einen zweiten Kältespeicher-Speicherbehälter;
- e3) Durchleiten des Arbeitsfluids durch eine Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung innerhalb des Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers und
- e4) Wärmeaustausch zwischen dem Arbeitsfluid und den im Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher befindlichen Feststoffpartikeln im fluidisierten Zustand.

[0035] Das zweite Fluidisierungsgas ist bevorzugt ausgewählt aus: getrockneter Luft, Stickstoff,

Argon oder mit Stickstoff angereicherte Luft.

[0036] Zum Ausspeichern von Energie aus dem Arbeitsfluid werden bevorzugt folgende Schritte durchgeführt:

- g) Ableiten von Arbeitsfluid aus dem kryogenen Speichertank,
- h) Erhöhen des Drucks des aus dem kryogenen Speichertank abgeleiteten Arbeitsfluids,
- i) Erhitzen des Arbeitsfluids mit im Kälte- und/oder Wärmespeicher gespeicherter Wärmeenergie durch Wärmeaustausch mit den Feststoffpartikeln des Kältespeicher- bzw. Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers,
- j) Betreiben einer Turbine mit dem erhitzten Arbeitsfluid.

[0037] Die mechanische Energie von der Turbine kann mit einem Generator in elektrische Energie umgewandelt werden.

[0038] Die Feststoffpartikel liegen zumindest in einem Temperaturbereich von -200°C bis 1000°C bei Atmosphärendruck, d.h. 101 325 Pascal, im festen Aggregatzustand vor.

[0039] Als Feststoffpartikel sind bevorzugt Sand-, insbesondere Quarzsand, oder natürliche oder synthetische Korund- oder Bauxit-Partikel vorgesehen.

[0040] Die Erfindung wird nachstehend anhand eines in den Figuren gezeigten Ausführungsbeispiels weiter erläutert.

[0041] Fig. 1 zeigt ein Übersichtsschema eines LAES-Energiespeichersystems.

[0042] Fig. 2 zeigt ein Funktionsschema einer ersten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen LAES-Energiespeichersystems zur Umsetzung eines Kapitza-Prozesses, wobei der Wärme- und der Kältespeicher jeweils einen Wirbelschicht-Wärmetauscher aufweist.

[0043] Fig. 3 zeigt ein Funktionsschema einer zweiten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen LAES-Energiespeichersystems zur Umsetzung eines Linde-Hampton-Prozesses.

[0044] Fig. 4 zeigt schematisch eine erste Ausführungsform des Wärmespeichers des LAES-Energiespeichersystems gemäß Fig. 2 oder Fig. 3, wobei ein offener Fluidisierungsgas-Kreislauf vorgesehen ist.

[0045] Fig. 5 zeigt schematisch eine zweite Ausführungsform des Kältespeichers des LAES-Energiespeichersystems gemäß Fig. 2 oder Fig. 3, wobei ein geschlossener Fluidisierungsgas-Kreislauf vorgesehen ist.

[0046] Fig. 1 zeigt schematisch ein kryogenes Energiespeichersystem 1, welches in dem gezeigten Ausführungsbeispiel ein LAES-(Liquid Air Energy Storage)-Energiespeichersystem ist.

[0047] Das kryogene Energiespeichersystem 1 weist die folgenden Komponenten auf:

- a) Mit einer Gaszufuhreinheit wird ein Arbeitsfluid 2, im gezeigten Beispiel Luft, im gasförmigen Zustand zugeführt.
- b) Mit einer Arbeitsfluidreinigungs- und Kompressoreinheit 3 wird das mit der Gaszufuhreinheit zugeführte Arbeitsfluid im gasförmigen Zustand mittels elektrischer Energie (vgl. Pfeil 4) gereinigt und komprimiert.
- c) Bei der Komprimierung des Arbeitsfluids im gasförmigen Zustand mittels der Arbeitsfluidreinigungs- und Kompressoreinheit 3 wird Wärme freigesetzt, welche in einem Wärmespeicher 5 gespeichert wird (vgl. Pfeil 6).
- d) Mit der Arbeitsfluidreinigungs- und Kompressoreinheit 3 ist eine Kühl- und Verflüssigungseinheit 7 verbunden, mit welcher das Arbeitsfluid abgekühlt und verflüssigt wird.
- e) Bei der Abkühlung und Verflüssigung des Arbeitsfluids wird von einem Kältespeicher 8 Kälte an das Arbeitsfluid abgegeben (vgl. Pfeil 9).

- f) Mit der Kühl- und Verflüssigungseinheit 7 ist ein kryogener Speichertank 10 verbunden, welchem das verflüssigte Arbeitsfluid zugeführt wird (vgl. Pfeil 11). Damit ist der Einspeicherprozess, d.h. die Einspeicherphase, abgeschlossen (vgl. Abschnitt A in Fig. 1). In dem kryogenen Speichertank 10 kann das Arbeitsfluid während der Speicherphase im verflüssigten Zustand gespeichert werden (vgl. Abschnitt B), bis der Ausspeicherprozess, d.h. die Ausspeicherphase, zur Rückgewinnung von elektrischer Energie (vgl. Abschnitt C) begonnen wird.
- g) Mit dem kryogenen Speichertank 10 ist eine Verdampfungseinheit 12 verbunden, mit welcher das Arbeitsfluid beim Ausspeicherprozess verdampft wird. Die Verdampfungseinheit 12 ist mit dem Kältespeicher 8 verbunden, so dass beim Verdampfen des Arbeitsfluids freierwerdende Kälte in den Kältespeicher 8 gespeichert wird (vgl. Pfeil 13).
- h) An die Verdampfungseinheit 12 ist eine Energierückgewinnungseinheit 14 angeschlossen, welche insbesondere eine Expansionsturbineneinheit 15 (vgl. Fig. 2) und einen Generator (nicht gezeigt) aufweisen kann. Zur Rückgewinnung von elektrischer Energie (vgl. Pfeil 16) wird das Arbeitsfluid unter Zufuhr von Wärme von dem Wärmespeicher 5 (vgl. Pfeil 17) erhitzt und expandiert. Mit dem erhitzten und expandierten Arbeitsfluid wird die Expansionsturbineneinheit 15 betrieben. Die von der Expansionsturbineneinheit 15 bereitgestellte mechanische Energie wird mittels des Generators in elektrische Energie umgewandelt.
- i) Mit einer Gasabfuhreinheit wird das Arbeitsfluid im gasförmigen Zustand vom Ausgang der Energierückgewinnungseinheit 14 abgeführt (vgl. Pfeil 18).

[0048] In Fig. 2 ist ein Funktionsschema einer ersten erfindungsgemäßen Ausführung des kryogenen Energiespeichersystems 1 gezeigt, bei welchem einerseits der Wärmespeicher 5 und andererseits der Kältespeicher 8 als Wirbelschicht-Speicher ausgebildet sind.

[0049] Der Lade- bzw. Einspeicherprozess ist mit Pfeil 19, der Entlade- bzw. Ausspeicherprozess ist mit Pfeil 20 symbolisiert.

[0050] Beim Einspeicherprozess wird das Arbeitsfluid 2 der Arbeitsfluidreinigungs- und Kompressoreinheit 3 zugeführt, welche ein Arbeitsfluidreinigungsmodul 3A aufweist, mit dem das Arbeitsfluid von Verunreinigungen befreit wird, die für die spätere Verflüssigung nachteilig sind.

[0051] Die Arbeitsfluidreinigungs- und Kompressoreinheit 3 weist zudem eine erste Kompressorstufe 3B, eine zweite Kompressorstufe 3C und eine n-te Kompressorstufe 3D auf. Die Anzahl der Kompressorstufen ist je nach Anwendung beliebig.

[0052] In der gezeigten Ausführungsform weist der Wärmespeicher 5 zur Zwischenspeicherung der bei der Kompression entstehenden Wärme zumindest einen Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 21, 22, 23 auf. Im gezeigten Ausführungsbeispiel sind ein erster Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 21, ein zweiter Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 22 und ein n-ter Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 23 vorgesehen, welche jeweils mit einer Wärmespeicher-Fluidisierungseinrichtung 33A (vgl. Fig. 4) zum Einleiten eines Fluidisierungsgases in den ersten 21, zweiten 22 bzw. n-ten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 23 verbunden sind. Der erste 21, zweite 22 und n-te Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 23 sind jeweils mit zumindest einem, im gezeigten Ausführungsbeispiel mit genau einem, ersten Wärmespeicher-Speicherbehälter 24 und mit zumindest einem, im gezeigten Ausführungsbeispiel mit genau einem, zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter 25 verbunden. Der erste Wärmespeicher-Speicherbehälter 24 dient als Kältspeicher, der zweite Wärmespeicher-Speicherbehälter 25 dient als Heißspeicher für Feststoffpartikel, vorzugsweise Sand, insbesondere Quarzsand, oder natürliche oder synthetische Korund- oder Bauxit-Partikel. Die Feststoffpartikel im Kältspeicher sind kälter als jene im Heißspeicher.

[0053] Nach dem Durchlaufen der ersten Kompressorstufe 3B tritt das Arbeitsfluid 2 in den ersten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 21 ein, um bei der Komprimierung des Arbeitsfluids anfallende Wärme für den späteren Ausspeicherprozess (siehe unten) zu speichern. Zu diesem Zweck werden Feststoffpartikel vom ersten Wärmespeicher-Speicherbehälter 24, dem Kältspeicher, über den ersten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 21 in den zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter 25, den Heißspeicher, transportiert. In dem ersten Wärmespeicher-

Wirbelschichtwärmetauscher 21 werden die Feststoffpartikel mittels des Fluidisierungsgases, hier Luft, in einen fluidisierten Zustand versetzt. Das Arbeitsfluid wird, hier im gasförmigen Zustand, durch eine erste Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung 26 (vgl. Fig. 4) geleitet, welche sich im Inneren des ersten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers 21 erstreckt. Über die Wandung der ersten Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung 26 wird ein Wärmeaustausch zwischen dem Arbeitsfluid im gasförmigen Zustand und den Feststoffpartikeln im fluidisierten Zustand bewerkstelligt. Bei dem Wärmeaustausch in dem ersten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 21 gibt das Arbeitsfluid Wärme an die Feststoffpartikel ab, so dass die Feststoffpartikel beim Durchgang durch den ersten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 21 mittels der Wärme des Arbeitsfluids erhitzt werden. Das Arbeitsfluid hingegen kühlt sich durch die Wärmeabgabe an die Feststoffpartikel ab.

[0054] Danach werden die erhitzten Feststoffpartikel vom ersten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 21 in den zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter 25 transportiert. Dafür kann eine Transporteinheit (nicht gezeigt) vorgesehen sein, welche die erhitzten Feststoffpartikel, vorzugsweise am oberen Ende, in den zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter 25 aufgibt. Als Transporteinheit kann beispielsweise ein Becherwerk oder ein Skip Hoist vorgesehen sein. Ein Skip Hoist ist eine Transporteinheit, welche für das Bewegen von Schüttgut oder anderem Material verwendet werden kann. Dieser Skip Hoist weist mindestens einen Behälter auf, der an einer oberen bzw. unteren Endposition befüllt und an der anderen Endposition entladen wird. Der mindestens eine Behälter bewegt sich entlang eines Gerüsts und wird, beispielsweise durch ein Kabel, bewegt. Alternativ können die Feststoffpartikel jedoch auch mittels des Fluidisierungsgases, im pneumatischen Transport, in den zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter 25 überführt werden.

[0055] Nach dem Durchströmen des ersten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers 21 wird das Arbeitsfluid, weiterhin im gasförmigen Zustand, der zweiten Kompressorstufe 3C zugeführt, in welcher das Arbeitsfluid weiter verdichtet wird. Anschließend wird das Arbeitsfluid in eine zweite Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung (entsprechend der ersten Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung 26 in Fig. 4) geführt, welche sich im Inneren des zweiten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers 22 erstreckt. Vom ersten Wärmespeicher-Speicherbehälter 24 werden Feststoffpartikel über den zweiten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 22 in den zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter 25 überführt. Dadurch wird über die Wandung der zweiten Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung ein Wärmeaustausch zwischen dem Arbeitsfluid im gasförmigen Zustand und den Feststoffpartikeln im fluidisierten Zustand bewerkstelligt. Bei dem Wärmeaustausch in dem zweiten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 22 gibt das Arbeitsfluid Wärme an die Feststoffpartikel ab, so dass die Feststoffpartikel beim Durchgang durch den zweiten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 22 mittels der Wärme des Arbeitsfluids erhitzt werden. Das Arbeitsfluid hingegen kühlt sich durch die Wärmeabgabe an die Feststoffpartikel ab. Die erhitzten Feststoffpartikel werden vom zweiten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 22 in den zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter 25 transportiert. Dafür kann eine weitere Transporteinheit, wie oben beschrieben, vorgesehen sein, welche die erhitzten Feststoffpartikel, vorzugsweise am oberen Ende, in den zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter 25 aufgibt.

[0056] Je nach Ausführung können die oben beschriebenen Komponenten auch in größerer Anzahl vorliegen. Dies wird in der Zeichnung durch die n-te Kompressorstufe 3D symbolisiert, welche mit dem n-ten Wärmespeicher Wirbelschichtwärmetauscher 23 verbunden ist. Eine n-te Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung führt das Arbeitsfluid in den n-ten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 23, in welchem der Wärmeaustausch mit den fluidisierten Feststoffpartikeln stattfinden.

[0057] Anschließend wird das Arbeitsfluid in die Kühl- und Verflüssigungseinheit 7 überführt, welcher der Kältespeicher 8 zugeordnet ist. Der Kältespeicher 8 ist entsprechend dem Wärmespeicher 5 aufgebaut. Demnach weist der Kältespeicher 8 zumindest einen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher auf, in welchem ein Inventar aus Feststoffpartikeln aufgenommen wird. Im gezeigten Beispiel ist ein erster Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 30, ein zweiter Käl-

tespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 31 und ein n-ter Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 32 vorgesehen, welcher symbolisch für die anwendungsspezifische Anzahl von Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauschern steht. Der erste 30, zweite 31 und n-te Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 32 ist jeweils mit einer Kältespeicher-Fluidisierungseinrichtung 33B (vgl. Fig. 5) zum Einleiten eines weiteren Fluidisierungsgases verbunden, so dass das Inventar aus Feststoffpartikeln im jeweiligen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 30, 31, 32 mittels des Fluidisierungsgases in einen fluidisierten Zustand versetzt wird. Der erste 30, zweite 31 und n-te Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 32 ist jeweils mit einem ersten Kältespeicher-Speicherbehälter 34 und einem zweiten Kältespeicher-Speicherbehälter 35 verbunden. Der erste Kältespeicher-Speicherbehälter 34 dient als Kältspeicher, der zweite Kältespeicher-Speicherbehälter 35 dient als Warmspeicher für (weniger kalte) Feststoffpartikel, insbesondere Sand. Das bedeutet, dass die Feststoffpartikel im Kältspeicher kälter als im Warmspeicher sind.

[0058] Der Kältespeicher 8 weist analog zum Wärmespeicher 5 eine in den ersten Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 30 geführte erste Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung 36 für das beim Einspeichern zu verflüssigende Arbeitsfluid 2 (vgl. Fig. 5), eine in den zweiten Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 31 geführte zweite Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung (entsprechend der ersten Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung 36 in Fig. 5) und eine in den n-ten Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 32 geführte n-te Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung (ebenfalls entsprechend der ersten Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung 36 in Fig. 5) auf. Zusätzlich weist der Kältespeicher 8 eine der ersten Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung 36 entgegengesetzt laufende Wärmeaustauschleitung 45 auf, welche weiter unten näher erläutert wird. Somit kann durch Wärmeaustausch zwischen dem Arbeitsfluid 2 in der jeweiligen Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung und den fluidisierten Feststoffpartikeln im jeweiligen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher Kälte von den fluidisierten Feststoffpartikeln an das Arbeitsfluid abgegeben werden, wodurch das Arbeitsfluid abgekühlt wird. Ebenso kann durch den Wärmeaustausch zwischen dem abgeschiedenen, gasförmigen Arbeitsfluid, welches über die Wärmeaustauschleitung 45 rückgeführt wird, und dem Arbeitsfluid 2 selbiges abgekühlt werden (siehe auch weiter unten). Beim Transfer vom ersten Kältespeicher-Speicherbehälter 34 über den jeweiligen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 30, 31, 32 in den zweiten Kältespeicher-Speicherbehälter 35 werden die Feststoffpartikel entsprechend aufgewärmt.

[0059] Im Ausführungsbeispiel der Fig. 2 weist die Kühl- und Verflüssigungseinheit 7 zumindest eine erste 38 und eine zweite Kryo-Expansionsstufe 39 für das Arbeitsfluid auf. Die erste Kryo-Expansionsstufe 38 ist vom Strömungspfad zwischen dem ersten 30 und dem zweiten Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 31 abgezweigt. Die zweite Kryo-Expansionsstufe 39 ist zwischen dem zweiten 31 und dem n-ten Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 32 abgezweigt. Die Ausgänge der ersten 38 und zweiten Kryo-Expansionsstufe 39 sind in einer Sammelleitung 40 zusammengeführt, in welche zudem der Ausgang der n-ten Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung einmündet. Vor dem Eintritt des Arbeitsfluids aus dem n-ten Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher in die Sammelleitung 40 ist ein Ventil zur Drosselung auf den Druck der Gas-Flüssig-Separationseinheit 41 angeordnet. Die Sammelleitung 40 führt das teilweise verflüssigte Arbeitsfluid in die Gas-Flüssig-Separationseinheit 41.

[0060] Die Gas-Flüssig-Separationseinheit 41 weist einen ersten Ausgang 42 zur Zuführung von Arbeitsfluid im flüssigen Zustand in den kryogenen Speichertank 10 und einen zweiten Ausgang 43 zur Zuführung des Arbeitsfluids im gasförmigen Zustand in die oben erwähnte (Gegenstrom-)Wärmeaustauschleitung 45 auf, welche in den n-ten Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 32 führt. Diese Gegenströmung des Arbeitsfluids vom zweiten Ausgang 43 der Gas-Flüssig-Separationseinheit 41 über die Wärmeaustauschleitung 45 durch die einzelnen Stufen des Kältespeichers 8 trägt zur Abkühlung des Arbeitsfluids am Weg zur Gas-Flüssig-Separationseinheit 41 bei. Das rückgeführte, nicht verflüssigte Arbeitsfluid tritt nach dem Wärmeaustausch in den Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauschern vor der zweiten Kompressoreinheit 3C wie der in den Arbeitsfluidstrom 2 ein.

[0061] Beim Ausführungsbeispiel der Fig. 2 wird der Kapitza-Prozess umgesetzt, welcher einem modifizierten Claude-Prozess entspricht.

Dabei werden im Unterschied zum Linde-Hampton-Prozess gemäß Fig. 3 die Wärmekapazitätsströme des abzukühlenden Arbeitsfluids über isentrope Bypass-Expander reduziert, und die Wärmekapazitätsströme des im Gegenstrom rückzuführenden Arbeitsfluids werden erhöht.

[0062] Am Ende des Einspeicherprozesses ist Arbeitsfluid im verflüssigten Zustand im kryogenen Speichertank 10 gespeichert. In dem verflüssigten Arbeitsfluid 2 ist ein Teil der elektrischen Energie gespeichert, welche für die Komprimierung, Abkühlung und Verflüssigung des Arbeitsfluids 2 aufgewandt wurde. Mit dem Wärme- 5 und dem Kältespeicher 8 wird die Effizienz der Zwischenspeicherung wesentlich erhöht. Der kryogene Speichertank 10 weist eine thermische Isolierung auf, um Energieverluste beim Speichern zu minimieren. Darüber hinaus können der Wärmespeicher 5 und der Kältespeicher 8 eine Isolierung aufweisen.

[0063] Wenn die Energie aus dem gespeicherten Arbeitsfluid 2 im Speichertank 10 rückgewonnen werden soll, wird der Ausspeicherprozess eingeleitet. Dafür wird Arbeitsfluid 2 vom kryogenen Speichertank 10 in die Verdampfungseinheit 12 überführt, welche im gezeigten Ausführungsbeispiel eine Kryo-Pumpe 44 aufweist, mit welcher beim Ausspeichern aus dem kryogenen Speichertank 10 entladenes Arbeitsfluid 2 auf einen überkritischen Druck gebracht wird. Die Kryo-Pumpe 44 ist mit dem letzten des zumindest einen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers, d.h. im gezeigten Ausführungsbeispiel mit dem n-ten Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 32, verbunden. Der Ausdruck „letzte“ bezieht sich dabei auf die Strömungsrichtung des Arbeitsfluids 2 beim Einspeicherprozess am Weg zum kryogenen Speichertank 10. Durch Wärmeaustausch mit den Feststoffpartikeln im fluidisierten Zustand im Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher wird das auf überkritischen Druck gebrachte Arbeitsfluid erwärmt. Umgekehrt werden die Feststoffpartikel abgekühlt. Dafür werden die Feststoffpartikel im Vergleich zum Einspeicherprozess in entgegengesetzte Richtung, nämlich vom zweiten Kältespeicher-Speicherbehälter 35 über den jeweiligen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher („cryo HEX“, d.h. cryo heat exchanger) in den ersten Kältespeicher-Speicherbehälter 34 überführt. Das Arbeitsfluid 2 wird beim Ausspeichern durch zumindest eine Ausspeicher-Wärmeaustauschleitung geführt, welche sich durch den jeweiligen, zumindest einen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher erstreckt. Im gezeigten Ausführungsbeispiel wird das Arbeitsfluid beim Ausspeichern nacheinander durch Ausspeicher-Wärmeaustauschleitungen im n-ten 32, zweiten 31 und ersten Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 30 geführt. Somit kann im Ausspeicherprozess Kälte vom Arbeitsfluid 2 aus dem kryogenen Speichertank 10 in den Feststoffpartikeln gespeichert werden. Diese Kälte kann beim nächsten Einspeicherprozess zur Abkühlung des Arbeitsfluids am Weg zum kryogenen Speichertank 10 genutzt werden. Der Kältespeicher 8 ist mit dem Wärmespeicher 5 verbunden. Somit kann beim Ausspeicherprozess das vom kryogenen Speichertank 10 entladene, mit der Kryo-Pumpe 44 auf überkritischen Druck gebrachte und durch Wärmeaustausch im Kältespeicher 8 erwärmte Arbeitsfluid mit dem Wärmespeicher 5 weiter erhitzt wird. Zu diesem Zweck wird das Arbeitsfluid nacheinander in entgegengesetzte Richtung zum Arbeitsfluid am Weg zum kryogenen Speichertank 10 durch weitere Ausspeicher-Wärmeaustauschleitungen im n-ten 32, zweiten 31 bzw. ersten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 30 geführt.

[0064] Im gezeigten Ausführungsbeispiel weist die Expansionsturbineneinheit 15 eine erste Turbinenstufe 46, eine zweite Turbinenstufe 47 und eine n-te Turbinenstufe 48 auf, mit welcher die anwendungsspezifische Anzahl der Turbinenstufen symbolisiert wird. In Strömungsrichtung des Arbeitsfluids 2 beim Ausspeicherprozess (d.h. entgegen der Strömungsrichtung des Arbeitsfluids 2 beim Einspeicherprozess) gesehen durchströmt das Arbeitsfluid 2 abwechselnd die einzelnen Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher, beginnend mit dem n-ten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher 23, und die einzelnen Turbinenstufen, beginnend mit der ersten Turbinenstufe 46. Am Ausgang der n-ten Turbinenstufe 48 wird das Arbeitsfluid abgeleitet. Die mechanische Energie der Expansionsturbineneinheit 15 kann über den Generator in elektrische Energie umgewandelt werden.

[0065] Fig. 3 zeigt eine weitere Ausführungsform des erfindungsgemäßen LAES-Speichersystems 1, entsprechend dem Linde-Hampton-Prozess. Der obere Teil des Anlagenschemas ist wie in Fig. 2 ausgeführt, so dass auf die obigen Erläuterungen verwiesen werden kann. Die Kühl- und Verflüssigungseinheit 7 ist jedoch anders, insbesondere einfacher, als in Fig. 2 ausgeführt. Ge-

mäß Fig. 3 weist der Kältespeicher 8 nur einen einzigen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (z.B. entsprechend Wirbelschichtwärmetauscher 30 oben) auf. Die Kryo-Expansionsstufen der Fig. 2 sind nicht vorgesehen. Das bereits verdichtete und vorgekühlte Arbeitsfluid 2 wird durch die im Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher vorhandene Kältespeicher-Wärmeauschleitung geleitet und durch Wärmeaustausch mit den dort vorhandene Feststoffpartikel gekühlt. Anschließend wird das gekühlte Arbeitsfluid mit einem Ventil bzw. einer Drossel entspannt. Hierbei kühlt das Arbeitsfluid weiter ab und wird danach der Gas-Flüssig-Separationseinheit 41 zugeführt. Dort wird der bei der Entspannung entstandene gasförmige Anteil des Arbeitsfluids vom flüssigen Anteil getrennt. Das Arbeitsfluid in flüssigem Zustand wird dann dem kryogenen Speichertank 10 zugeführt.

[0066] In Fig. 4 ist eine Ausführungsform des Wärmespeichers 5 des LAES-Systems 1 der Fig. 2 oder Fig. 3 im Detail dargestellt. Der Wärmespeicher 5 weist folgende Komponenten auf:

- a) den Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher mit den Feststoffpartikeln und dem Fluidisierungsgas;
- b) die Wärmespeicher-Fluidisierungseinrichtung 33A, mit der Fluidisierungsgas in den Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher eingeleitet wird, um das Inventar aus Feststoffpartikeln in einen fluidisierten Zustand zu versetzen;
- c) den ersten Wärmespeicher-Speicherbehälter 24, in dem die Feststoffpartikeln gespeichert werden können;
- d) den zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter 25, in dem die Feststoffpartikeln gespeichert werden können, wobei der erste Wärmespeicher-Speicherbehälter 24 mit dem zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter 25 über den Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher verbunden ist;
- e) die Wärmespeicher-Wärmeauschleitung 26, in der das Arbeitsfluid 2 in gasförmigem Zustand geleitet werden kann, wobei ein Wärmeaustausch zwischen dem Arbeitsfluid 2 und den Feststoffpartikeln stattfindet;
- f) eine Wärmespeicher-Umgebungsluftkompressionseinrichtung 50, mit der Umgebungsluft angesaugt und verdichtet werden kann, um diese Umgebungsluft als Fluidisierungsgas einzusetzen;
- g) eine Wärmespeicher-Wärmerückgewinnungseinrichtung 51, die das Fluidisierungsgas, hier Umgebungsluft, vorwärmt;
- h) eine Wärmespeicher-Abzugsleitung 52, mit der Fluidisierungsgas aus dem Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher in die Wärmespeicher-Wärmerückgewinnungseinrichtung 51 geleitet werden kann;
- i) eine Wärmespeicher-Filtereinrichtung 58, mit der das aus der Wärmespeicher-Wärmerückgewinnungseinrichtung 51 kommende Fluidisierungsgas gefiltert werden kann.
- j) eine Wärmespeicher-Absaugereinrichtung 53 für das Fluidisierungsgas;

[0067] Somit wird beim Wärmespeicher 5 im gezeigten Beispiel ein offener Kreislauf für das Fluidisierungsgas umgesetzt.

[0068] In Fig. 5 ist eine Ausführungsform des Kältespeichers 8 des LAES-Systems 1 der Fig. 2 oder Fig. 3 beim Einspeichern im Detail dargestellt. Der Kältespeicher 8 weist folgende Komponenten auf:

- a) den Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher mit dem Inventar aus Feststoffpartikeln;
- b) die Kältespeicher-Fluidisierungseinrichtung 33B, mit der Fluidisierungsgas in den Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher eingeleitet wird, um das Inventar aus Feststoffpartikeln in einen fluidisierten Zustand zu versetzen;
- c) den ersten Kältespeicher-Speicherbehälter 34, in dem das Inventar aus Feststoffpartikeln gespeichert werden kann;

- d) den zweiten Kältespeicher-Speicherbehälter 35, in dem das Inventar aus Feststoffpartikeln gespeichert werden kann, wobei der erste Kältespeicher-Speicherbehälter 34 mit dem zweiten Kältespeicher-Speicherbehälter 35 über den Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher verbunden ist;
- e) die Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung 36, in der Arbeitsfluid 2 in gasförmigem (oder flüssigem) Zustand geleitet werden kann, wobei ein Wärmeaustausch zwischen dem Arbeitsfluid 2 und den Feststoffpartikeln stattfindet;
- f) die der Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung 36 entgegengesetzt laufende Wärmeaustauschleitung 45, in der vom Ausgang 43 rückgeführtes Arbeitsfluid 2 in gasförmigem Zustand geleitet werden kann, wobei ein Wärmeaustausch zwischen dem Arbeitsfluid 2 und den Feststoffpartikeln stattfindet;
- g) eine Kältespeicher-Kompressionseinrichtung 54, mit der das Fluidisierungsgas durch den geschlossenen Kreislauf bewegt und auf die benötigte Fluidisierungsgeschwindigkeit gebracht werden kann;
- h) eine Kältespeicher-Wärmerückgewinnungseinrichtung 55, die das Fluidisierungsgas mit dem bereits für die Fluidisierung verwendeten Fluidisierungsgas vorkühlt;
- i) eine Kältespeicher-Abzugsleitung 56, mit dem Fluidisierungsgas aus dem Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher in die Kältespeicher-Wärmerückgewinnungseinrichtung 55 geleitet werden kann;
- j) eine Kältespeicher-Filtereinrichtung 57, mit der das aus der Kältespeicher-Wärmerückgewinnungseinrichtung 55 kommende Fluidisierungsgas gefiltert werden kann;

[0069] Somit wird beim Kältespeicher 8 bevorzugt ein geschlossener Kreislauf für das Fluidisierungsgas verwirklicht. Das zweite Fluidisierungsgas wird aus folgenden Gasen ausgewählt: getrocknete Luft, Stickstoff, Argon oder mit Stickstoff angereicherte Luft.

[0070] Alternativ kann aber auch der Wärmespeicher 5 nach Fig. 5 und/oder der Kältespeicher 8 nach Fig. 4 ausgebildet sein.

[0071] Zusammenfassend kann das folgende Verfahren zum Speichern von Energie mittels eines kryogenen Energiespeichersystems 1, insbesondere LAES- (Liquid Air Energy Storage)-Energiespeichersystems, durchgeführt werden:

- a) Zuführung eines Arbeitsfluids 2, insbesondere von Luft, im gasförmigen Zustand,
- b) Komprimierung des Arbeitsfluids 2 im gasförmigen Zustand,
- c) Speicherung bei der Komprimierung des Arbeitsfluids im gasförmigen Zustand entstehender Wärme in einem Wärmespeicher 5,
- d) Abkühlung und Verflüssigung des Arbeitsfluids 2,
- e) Abgabe von Kälte von einem Kältespeicher 8 an das Arbeitsfluid 2 bei der Abkühlung und Verflüssigung des Arbeitsfluids 2,
- f) Speicherung des verflüssigten Arbeitsfluids in einem kryogenen Speichertank 10,

[0072] wobei die Speicherung bei der Komprimierung des Arbeitsfluids 2 im gasförmigen Zustand entstehender Wärme in dem Wärmespeicher (Schritt c)) umfasst:

- c1) Einleiten eines ersten Fluidisierungsgases in einen Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher, um ein darin enthaltenes Inventar aus Feststoffpartikeln in einen fluidisierten Zustand zu versetzen;
- c2) Fördern von Feststoffpartikeln von einem ersten Wärmespeicher-Speicherbehälter 24 über den Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher in einen zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter 25;
- c3) Durchleiten des Arbeitsfluids 2 im gasförmigen Zustand durch eine Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung innerhalb des Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers und

- c4) Wärmeaustausch zwischen dem Arbeitsfluid 2 im gasförmigen Zustand und den im Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher befindlichen Feststoffpartikeln im fluidisierten Zustand,

[0073] wobei die Abgabe von Kälte von dem Kältespeicher 8 an das Arbeitsfluid bei der Abkühlung und Verflüssigung des Arbeitsfluids (Schritt e)) umfasst:

- e1) Einleiten eines zweiten Fluidisierungsgases in einen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher, um ein darin enthaltenes Inventar aus Feststoffpartikeln in einen fluidisierten Zustand zu versetzen;
- e2) Fördern von Feststoffpartikeln von einem ersten Kältespeicher-Speicherbehälter 34 über den Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher in einen zweiten Kältespeicher-Speicherbehälter 35;
- e3) Durchleiten des Arbeitsfluids 2 durch eine Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung innerhalb des Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers und
- e4) Wärmeaustausch zwischen dem Arbeitsfluid 2 und den im Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher befindlichen Feststoffpartikeln im fluidisierten Zustand.

[0074] Zum Ausspeichern von Energie aus dem Arbeitsfluid 2 werden folgende Schritte durchgeführt:

- g) Ableiten von Arbeitsfluid 2 aus dem kryogenen Speichertank 10,
- h) Erhöhen des Drucks des aus dem kryogenen Speichertank 10 abgeleiteten Arbeitsfluids,
- i) Erhitzen des Arbeitsfluids 2 mit im Kälte- 8 und im Wärmespeicher 5 gespeicherter Wärmeenergie durch Wärmeaustausch mit den Feststoffpartikeln des Kältespeicher- bzw. Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers,
- j) Betreiben einer Turbine mit dem erhitzten Arbeitsfluid.

Patentansprüche

1. Kryogenes Energiespeichersystem (1), insbesondere LAES-(Liquid Air Energy Storage)-Energiespeichersystem, aufweisend:
 - a) eine Gaszufuhreinheit zur Zuführung eines Arbeitsfluids (2), insbesondere von Luft, im gasförmigen Zustand,
 - b) eine Kompressoreinheit (3) zur Komprimierung des Arbeitsfluids (2) im gasförmigen Zustand,
 - c) einen Wärmespeicher (5) zur Speicherung bei der Komprimierung des Arbeitsfluids (2) im gasförmigen Zustand entstehender Wärme,
 - d) eine Kühl- und Verflüssigungseinheit (7) zur Abkühlung und Verflüssigung des Arbeitsfluids (2),
 - e) einen Kältespeicher (8) zur Abgabe von Kälte an das Arbeitsfluid (2) bei der Abkühlung und Verflüssigung,
 - f) einen kryogenen Speichertank (10) zur Speicherung des verflüssigten Arbeitsfluids (2),
 - g) eine Verdampfungseinheit (12) zur Verdampfung von aus dem kryogenen Speichertank (10) entladenen Arbeitsfluid (2),
 - h) eine Energierückgewinnungseinheit (14), vorzugsweise mit zumindest einer Expansionsturbineneinheit (15), zur Rückgewinnung von Energie aus dem Arbeitsfluid (2),**dadurch gekennzeichnet**, dass
der Wärmespeicher (5) aufweist:
zumindest einen Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (21, 22, 23) mit einem Inventar aus Feststoffpartikeln;
zumindest eine Wärmespeicher-Fluidisierungseinrichtung (33A) zum Einleiten eines Fluidisierungsgases in den zumindest einen Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (21, 22, 23), um das Inventar aus Feststoffpartikeln in einen fluidisierten Zustand zu versetzen;
zumindest einen ersten Wärmespeicher-Speicherbehälter (24) für das Inventar aus Feststoffpartikeln;
zumindest einen zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter (25) für das Inventar aus Feststoffpartikeln, wobei der zumindest eine zweite Wärmespeicher-Speicherbehälter (25) über den zumindest einen Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (21, 22, 23) mit dem zumindest einen ersten Wärmespeicher-Speicherbehälter (24) verbunden ist;
zumindest eine das Arbeitsfluid (2) führende Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung (26, 27), welche in den zumindest einen Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (21, 22, 23) geführt ist, so dass Wärme zwischen dem Arbeitsfluid (2) und den Feststoffpartikeln im fluidisierten Zustand übertragbar ist.
2. Kryogenes Energiespeichersystem (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kompressoreinheit (3) zumindest eine erste Kompressorstufe (3B) und eine zweite Kompressorstufe (3C) zur stufenweisen Komprimierung des Arbeitsfluids (2) im gasförmigen Zustand aufweist.
3. Kryogenes Energiespeichersystem (1) nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zumindest eine Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung (26, 27) eine mit der ersten Kompressorstufe (3B) verbundene erste Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung (26) und eine mit der zweiten Kompressorstufe (3C) verbundene zweite Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung (27) jeweils für das Arbeitsfluid (2) im gasförmigen Zustand umfasst.
4. Kryogenes Energiespeichersystem (1) nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass der zumindest eine Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (21, 22, 23) einen ersten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (21) und einen zweiten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (22) umfasst, wobei die erste Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung (26) für das Arbeitsmedium im gasförmigen Zustand in den ersten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (21) und die zweite Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung (27) für das Arbeitsmedium im gasförmigen Zustand in den zweiten Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (22) geführt ist.

5. Kryogenes Energiespeichersystem (1) nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (21) und der zweite Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (22) des Wärmespeichers (5) mit demselben ersten Wärmespeicher-Speicherbehälter (24) und/oder mit demselben zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter (25) für das Inventar aus Feststoffpartikeln verbunden sind.
6. Kryogenes Energiespeichersystem (1) nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung (26) und die zweite Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung (27) für das Arbeitsfluid (2) im gasförmigen Zustand in den denselben Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher geführt sind.
7. Kryogenes Energiespeichersystem (1), insbesondere LAES-(Liquid Air Energy Storage)-Energiespeichersystem, aufweisend:
 - a) eine Gaszufuhreinheit zur Zuführung eines Arbeitsfluids (2), insbesondere von Luft, im gasförmigen Zustand,
 - b) eine Kompressoreinheit (3) zur Komprimierung des Arbeitsfluids (2) im gasförmigen Zustand,
 - c) einen Wärmespeicher (5) zur Speicherung bei der Komprimierung des Arbeitsfluids (2) im gasförmigen Zustand entstehender Wärme,
 - d) eine Kühl- und Verflüssigungseinheit (7) zur Abkühlung und Verflüssigung des Arbeitsfluids (2),
 - e) einen Kältespeicher (8) zur Abgabe von Kälte an das Arbeitsfluid (2) bei der Abkühlung und Verflüssigung,
 - f) einen kryogenen Speichertank (10) zur Speicherung des verflüssigten Arbeitsfluids (2),
 - g) eine Verdampfungseinheit (12) zur Verdampfung von aus dem kryogenen Speichertank (10) entladenen Arbeitsfluid (2),
 - h) eine Energierückgewinnungseinheit (14), vorzugsweise mit zumindest einer Expansionsturbineneinheit (15), zur Rückgewinnung von Energie aus dem Arbeitsfluid (2),**dadurch gekennzeichnet**, dass der Kältespeicher (8) aufweist:
 - zumindest einen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (30, 31, 32) mit einem Inventar aus Feststoffpartikeln;
 - zumindest eine Kältespeicher-Fluidisierungseinrichtung (33B) zum Einleiten eines Fluidisierungsgases in den zumindest einen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (30, 31, 32), um das Inventar aus Feststoffpartikeln in einen fluidisierten Zustand zu versetzen;
 - zumindest einen ersten Kältespeicher-Speicherbehälter (34) für das Inventar aus Feststoffpartikeln;
 - zumindest einen zweiten Kältespeicher-Speicherbehälter (35) für das Inventar aus Feststoffpartikeln, wobei der zumindest eine zweite Kältespeicher-Speicherbehälter (35) über den zumindest einen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (30, 31, 32) mit dem zumindest einen ersten Kältespeicher-Speicherbehälter (34) verbunden ist;
 - zumindest eine das Arbeitsfluid (2) führende Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung (36, 37), welche in den zumindest einen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (30, 31, 32) geführt ist, so dass Wärme zwischen dem Arbeitsfluid (2) und den Feststoffpartikeln im fluidisierten Zustand übertragbar ist.
8. Kryogenes Energiespeichersystem (1) nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass der zumindest eine Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (30, 31, 32) einen ersten (30) und einen zweiten Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (31) umfasst, wobei die zumindest eine Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung (36, 37) eine in den ersten Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (30) geführte erste Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung (36) und eine in den zweiten Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (31) geführte zweite Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung (37) umfasst.
9. Kryogenes Energiespeichersystem (1) nach Anspruch 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kühl- und Verflüssigungseinheit (7) zumindest eine erste (38) und eine zweite Kryo-Expansionsstufe (39) aufweist.

10. Kryogenes Energiespeichersystem (1) nach einem der Ansprüche 7 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Gas-Flüssig-Separationseinheit (41) vorgesehen ist, welche einen ersten Ausgang (42) zur Zuführung von Arbeitsfluid (2) im flüssigen Zustand in den kryogenen Speichertank (10) und einen zweiten Ausgang (43) zur Zuführung des Arbeitsfluids (2) im gasförmigen Zustand in einen des zumindest einen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers (30, 31, 32) aufweist.
11. Kryogenes Energiespeichersystem (1) nach einem der Ansprüche 7 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Verdampfungseinheit (12) eine mit dem kryogenen Speichertank (10) verbundene Kryo-Pumpe (44) aufweist, so dass beim Ausspeichern aus dem kryogenen Speichertank (10) entladenes Arbeitsfluid (2) mit der Kryo-Pumpe (44) auf einen überkritischen Druck überführbar ist.
12. Kryogenes Energiespeichersystem nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kryo-Pumpe (44) mit dem Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (30, 31, 32) verbunden ist, so dass beim Ausspeichern das vom kryogenen Speichertank (10) entladene und mit der Kryo-Pumpe (44) auf überkritischen Druck gebrachte Arbeitsfluid (2) durch Wärmeaustausch mit den Feststoffpartikeln im fluidisierten Zustand im Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher erwärmbar ist.
13. Kryogenes Energiespeichersystem (1) nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Kältespeicher (8) mit dem Wärmespeicher (5) verbunden ist, so dass beim Ausspeichern das vom kryogenen Speichertank (10) entladene, mit der Kryo-Pumpe (44) auf überkritischen Druck gebrachte und durch Wärmeaustausch im Kältespeicher (8) erwärmtes Arbeitsfluid (2) mit dem Wärmespeicher (5) weiter erhitzbar ist.
14. Kryogenes Energiespeichersystem (1) nach einem der Ansprüche 7 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Expansionsturbineneinheit (15) zumindest eine erste Turbinenstufe (46) und eine zweite Turbinenstufe (47) aufweist.
15. Kryogenes Energiespeichersystem (1) nach einem der Ansprüche 7 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kältespeicher-Fluidisierungseinrichtung (33B) einen geschlossenen Fluidisierungskreislauf für das Fluidisierungsgas aufweist.
16. Kryogenes Energiespeichersystem (1) nach einem der Ansprüche 7 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Wärmespeicher (5) aufweist:
 - zumindest einen Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (21, 22, 23) mit einem Inventar aus Feststoffpartikeln;
 - zumindest eine Wärmespeicher-Fluidisierungseinrichtung (33A) zum Einleiten eines Fluidisierungsgases in den Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (21, 22, 23), um das Inventar aus Feststoffpartikeln in einen fluidisierten Zustand zu versetzen;
 - zumindest einen ersten Wärmespeicher-Speicherbehälter (24) für das Inventar aus Feststoffpartikeln;
 - zumindest einen zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter (25) für das Inventar aus Feststoffpartikeln, wobei der zumindest eine zweite Wärmespeicher-Speicherbehälter über den zumindest einen Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (21, 22, 23) mit dem zumindest einen ersten Wärmespeicher-Speicherbehälter (24) verbunden ist;
 - zumindest eine das Arbeitsfluid (2) im gasförmigen Zustand führende Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung (26), welche in den zumindest einen Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher geführt ist, so dass Wärme zwischen dem Arbeitsfluid (2) im gasförmigen Zustand und den Feststoffpartikeln im fluidisierten Zustand übertragbar ist.
17. Verfahren zum Speichern von Energie mittels eines kryogenen Energiespeichersystems (1), insbesondere LAES-(Liquid Air Energy Storage)-Energiespeichersystems, mit den Schritten:
 - a) Zuführung eines Arbeitsfluids (2), insbesondere von Luft, im gasförmigen Zustand,
 - b) Komprimierung des Arbeitsfluids (2) im gasförmigen Zustand,
 - c) Speicherung bei der Komprimierung des Arbeitsfluids (2) im gasförmigen Zustand ent-

- stehender Wärme in einen Wärmespeicher (5),
- d) Abkühlung und Verflüssigung des Arbeitsfluids (2),
 - e) Abgabe von Kälte von einem Kältespeicher (8) an das Arbeitsfluid (2) bei der Abkühlung und Verflüssigung des Arbeitsfluids (2),
 - f) Speicherung des verflüssigten Arbeitsfluids (2) in einem kryogenen Speichertank (10),
- dadurch gekennzeichnet**, dass
- die Speicherung bei der Komprimierung des Arbeitsfluids (2) im gasförmigen Zustand entstehender Wärme in dem Wärmespeicher (5) gemäß Schritt c) umfasst:
- c1) Einleiten eines ersten Fluidisierungsgases in einen Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher, um ein darin enthaltenes Inventar aus Feststoffpartikeln in einen fluidisierten Zustand zu versetzen;
 - c2) Fördern von Feststoffpartikeln von einem ersten Wärmespeicher-Speicherbehälter (24) über den Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher in einen zweiten Wärmespeicher-Speicherbehälter (25);
 - c3) Durchleiten des Arbeitsfluids (2) im gasförmigen Zustand durch eine Wärmespeicher-Wärmeaustauschleitung innerhalb des Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers und
 - c4) Wärmeaustausch zwischen dem Arbeitsfluid (2) im gasförmigen Zustand und den im Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher befindlichen Feststoffpartikeln im fluidisierten Zustand und/oder dass die Abgabe von Kälte von dem Kältespeicher (8) an das Arbeitsfluid (2) bei der Abkühlung und Verflüssigung des Arbeitsfluids (2) gemäß Schritt e) umfasst:
 - e1) Einleiten eines zweiten Fluidisierungsgases in einen Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (31, 32, 33), um ein darin enthaltenes Inventar aus Feststoffpartikeln in einen fluidisierten Zustand zu versetzen;
 - e2) Fördern von Feststoffpartikeln von einem ersten Kältespeicher-Speicherbehälter (34) über den Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (31, 32, 33) in einen zweiten Kältespeicher-Speicherbehälter (35);
 - e3) Durchleiten des Arbeitsfluids (2) durch eine Kältespeicher-Wärmeaustauschleitung innerhalb des Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers und
 - e4) Wärmeaustausch zwischen dem Arbeitsfluid (2) und den im Kältespeicher-Wirbelschichtwärmetauscher (31, 32, 33) befindlichen Feststoffpartikeln im fluidisierten Zustand.
18. Verfahren nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass das zweite Fluidisierungsgas ausgewählt ist aus: getrockneter Luft, Stickstoff, Argon oder mit Stickstoff angereicherte Luft.
19. Verfahren nach Anspruch 17 oder 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass zum Ausspeichern von Energie aus dem Arbeitsfluid (2) folgende Schritte durchgeführt werden:
- g) Ableiten von Arbeitsfluid (2) aus dem kryogenen Speichertank (10),
 - h) Erhöhen des Drucks des aus dem kryogenen Speichertank (10) abgeleiteten Arbeitsfluids (2),
 - i) Erhitzen des Arbeitsfluids (2) mit im Kälte- (8) und/oder Wärmespeicher (5) gespeicherter Wärmeenergie durch Wärmeaustausch mit den Feststoffpartikeln des Kältespeicher- (31, 32, 33) bzw. Wärmespeicher-Wirbelschichtwärmetauschers (21, 22, 23),
 - j) Betreiben einer Turbine mit dem erhitzten Arbeitsfluid (2).

Hierzu 5 Blatt Zeichnungen

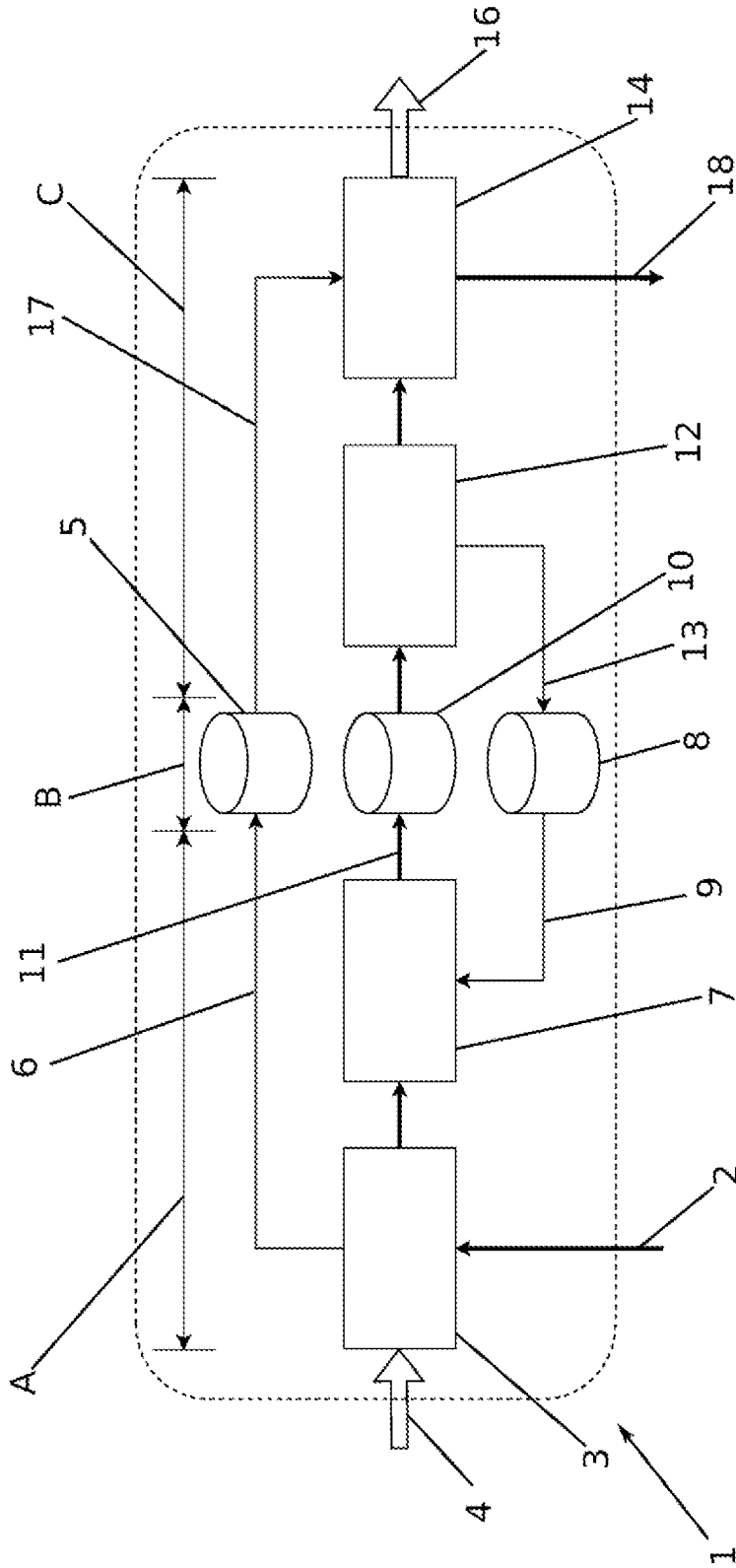


Fig. 1

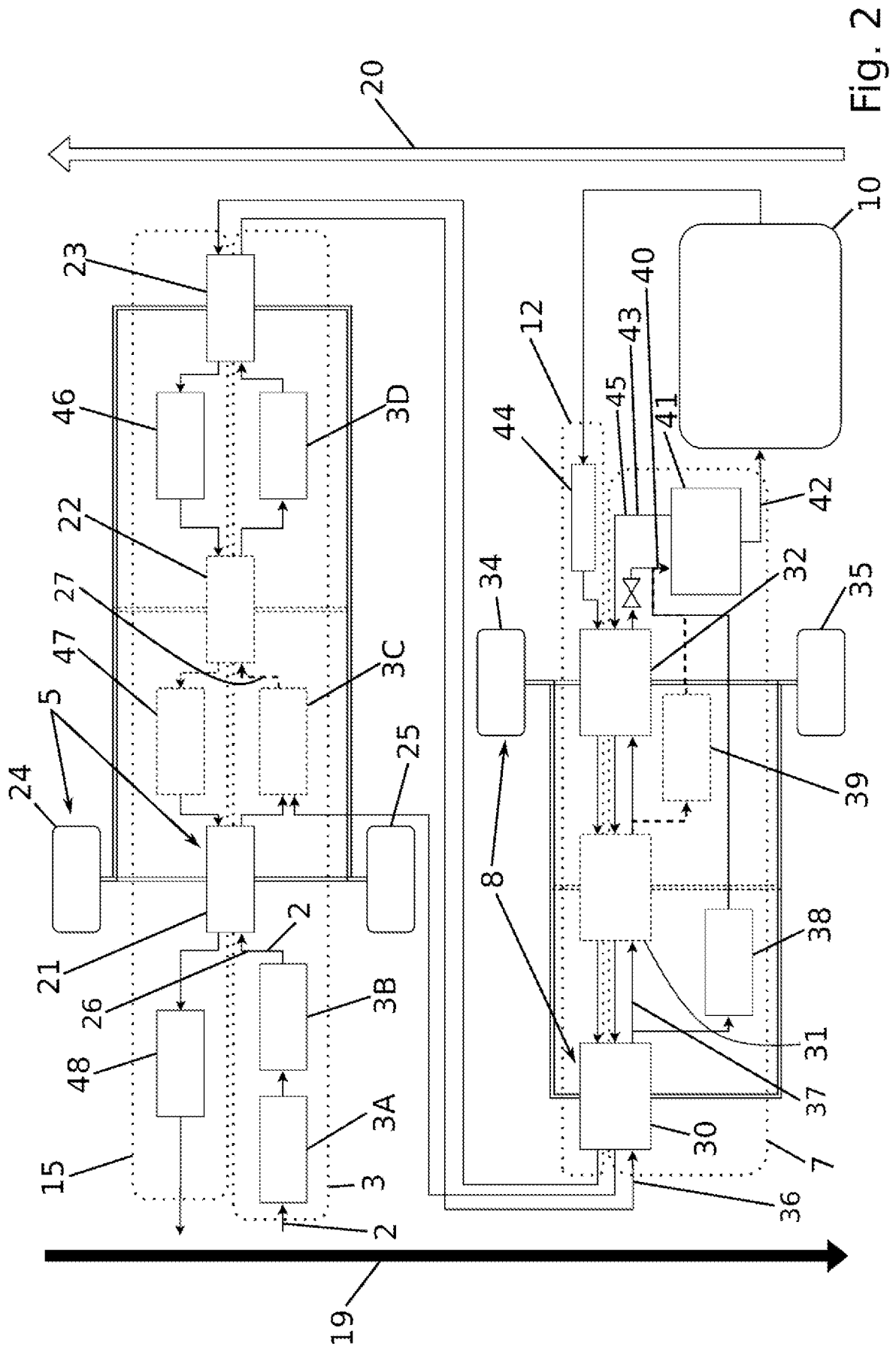


Fig. 2

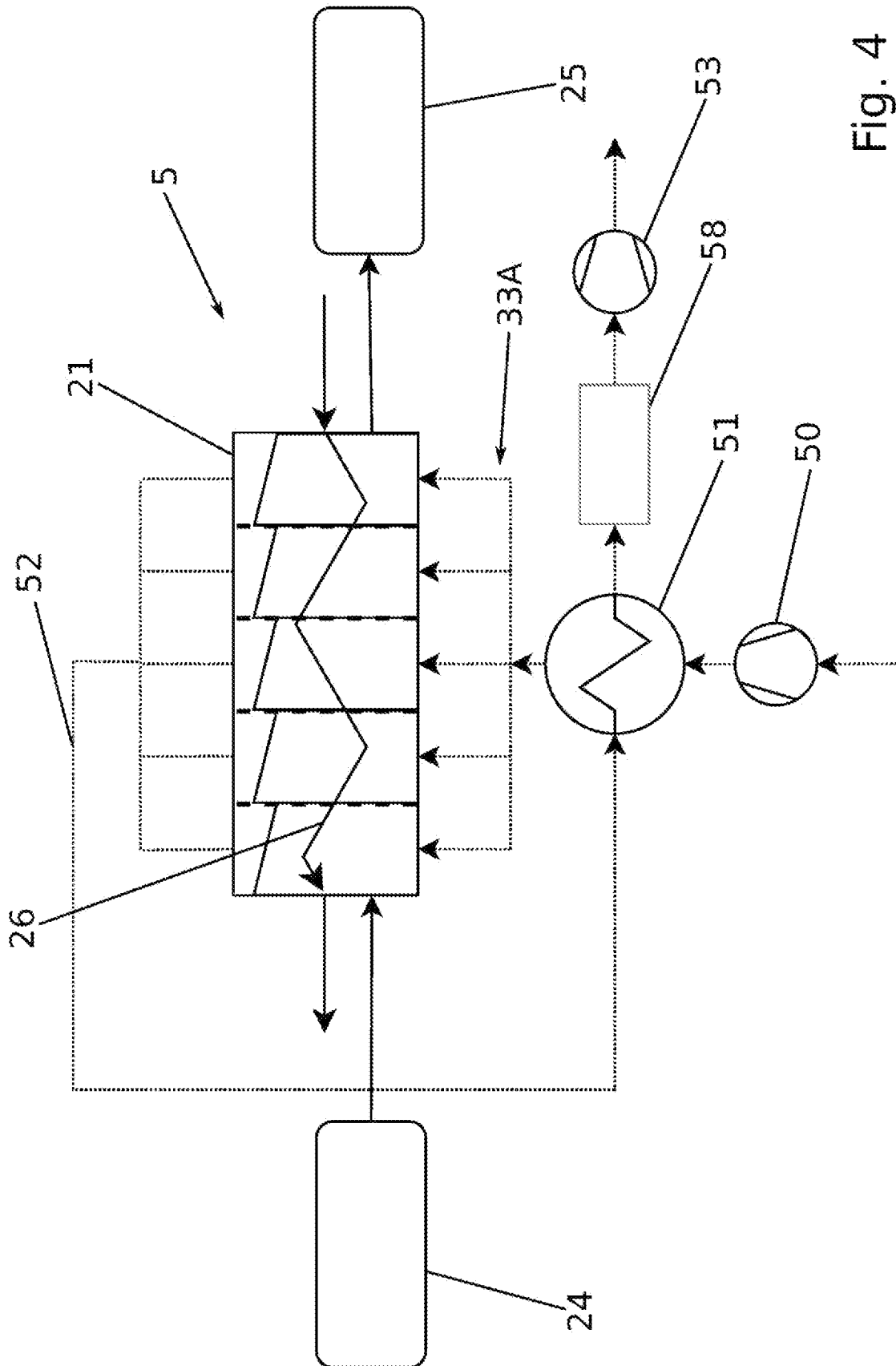


Fig. 4

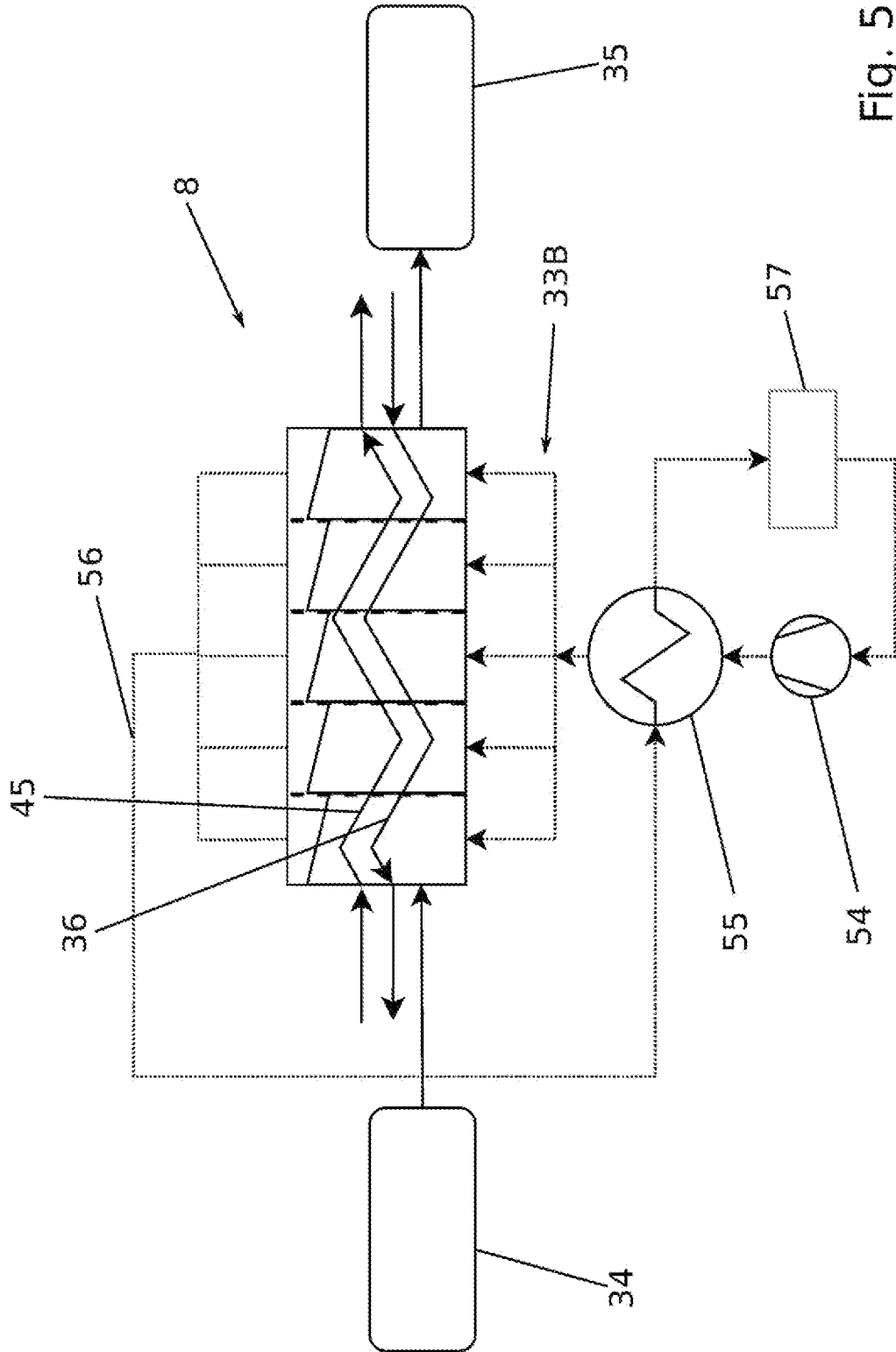


Fig. 5