



(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

- (43)

Veröffentlichungstag:
11.12.2024 Patentblatt 2024/50
- (51)

Internationale Patentklassifikation (IPC):
F22B 1/18 (2006.01)
- (21)

Anmeldenummer: 23177959.6
- (52)

Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
F22B 1/183; F22B 1/18
- (22)

Anmeldetag: 07.06.2023

- (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 ME MK MT NL
NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA
Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN
- (72)

Erfinder:
• Matschullat, Thomas
90542 Eckental (DE)
• Weinzierl, Klaus
90480 Nürnberg (DE)
- (74)

Vertreter: Metals@Linz
Primetals Technologies Austria GmbH
Intellectual Property Upstream IP UP
Turmstraße 44
4031 Linz (AT)
- (71)

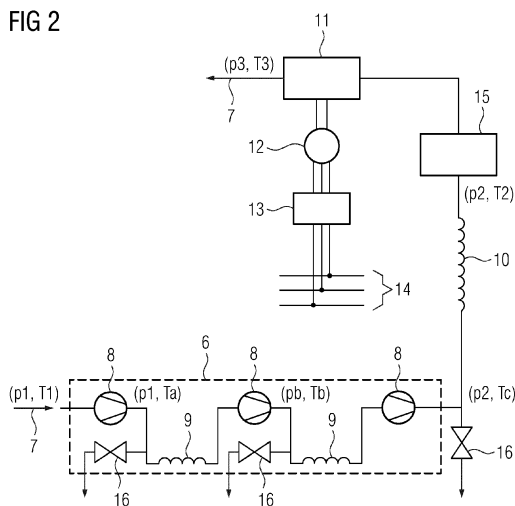
Anmelder: Primetals Technologies Germany
GmbH
91058 Erlangen (DE)

(54)

SYSTEM ZUR RÜCKGEWINNUNG VON ENERGIE

- (57)

Ein System zur Rückgewinnung von Energie weist eine Hauptanlage (1) auf, bei deren Betrieb ein heißes Abgas (2) entsteht. Die Hauptanlage (1) weist eine Abführeinrichtung (3) auf, welche von dem Abgas (2) durchströmt wird und über welche das Abgas (2) aus der Hauptanlage (1) abgeführt wird. Das System weist eine Anzahl von Kompressoren (8) aufweisende Kompressoranzordnung (6) auf, mittels derer der Kompressoranzordnung (6) zugeführte, eine Anfangstemperatur (T1) aufweisende Luft (7) von einem Anfangsdruck (p1) auf einen Enddruck (p2) und eine Zwischentemperatur (Tc) komprimiert wird. Das System weist einen der Kompressoranzordnung (6) nachgeordneten Wärmetauscher (10) auf, der von der auf den Enddruck (p2) und die Zwischentemperatur (Tc) komprimierten Luft (7) durchströmt wird und mittels dessen der den Wärmetauscher (10) durchströmenden Luft (7) die Wärme des die Abführeinrichtung (3) durchströmenden Abgases (2) zugeführt wird und so die Luft (7) auf eine Endtemperatur (T2) erwärmt wird. Das System weist einen dem Wärmetauscher (10) nachgeordneten Druckluftmotor (11) auf, dem die auf die Endtemperatur (T2) erwärmte und den Enddruck (p2) aufweisende Luft (7) zugeführt wird, der mit dieser Luft (7) betrieben wird und von dem die Luft (7) mit einer Abgabetemperatur (T3) und einem Abgabedruck (p3) abgegeben wird.



Beschreibung

Gebiet der Technik

- 5 **[0001]** Die vorliegende Erfindung geht aus von einem System zur Rückgewinnung von Energie,
- wobei das System eine Hauptanlage aufweist, bei deren Betrieb ein heißes Abgas entsteht,
 - wobei die Hauptanlage eine Abführeinrichtung aufweist, welche von dem Abgas durchströmt wird und über welche
- 10 das Abgas aus der Hauptanlage abgeführt wird.

Stand der Technik

[0002] Derartige Systeme sind allgemein bekannt. Rein beispielhaft kann auf die EP 10 770 810 B1 verwiesen werden.

15 Zusammenfassung der Erfindung

[0003] Bei vielen industriellen Prozessen fallen große Mengen an "minderwertiger" Wärmeenergie an. Diese Energiemengen werden oftmals nicht oder nur in geringem Umfang genutzt. Die Abwärme wird vielmehr einfach in die Umwelt abgegeben oder in der kalten Jahreszeit - wenn auch meist nur zu einem kleinen Teil - beispielsweise zum Heizen von Bürogebäuden oder Wohnungen verwendet. Beispielsweise bei einem Brammenofen eines Walzwerks liegt die eingesetzte thermische Leistung oftmals in der Größenordnung von etwa 100 MW. Es wird geschätzt, dass davon etwa 70 % tatsächlich in die Brammen fließt. Der Rest bleibt - bei einer typischen Abgastemperatur von etwa 300 °C - ungenutzt. Bei anderen industriellen Anlagen, beispielsweise einem Elektrostahlwerk, fallen manchmal noch größere Mengen an Abwärme an.

25 **[0004]** In vielen industriellen Anlagen werden weiterhin oftmals größere Mengen an Druckluft benötigt. Beispielsweise werden bei einer Kühlstrecke einer Warmbandstraße oftmals die Ventile, mittels derer Kühlwasser auf das gewalzte flache Walzgut aufgebracht wird, mit Druckluft betrieben. Auch wird die Druckluft beispielsweise dazu verwendet, überschüssiges Kühlwasser von der Oberseite des gewalzten flachen Walzguts abzublasen oder einen von Messgeräten weg gerichteten Luftstrom zu erzeugen, so dass diese nicht verschmutzen. Die Druckluft wird - sowohl bei einem

30 Stahlwerk als auch bei anderen industriellen Anlagen - mittels Kompressoren erzeugt, die mit elektrischer Energie angetrieben werden.

[0005] Die vielen Lösungen des Standes der Technik werden in der Praxis meist nicht eingesetzt. Insbesondere ist der Wirkungsgrad oftmals nur sehr gering und stehen die mit der Implementierung dieser Lösung verbundenen Kosten in keinem vernünftigen Verhältnis zur möglichen Rückgewinnung von Energie.

35 **[0006]** Es ist bekannt, in der Abführeinrichtung einen Wärmetauscher zu installieren, der ein Thermoöl aufheizt. Mittels des erwärmten Thermoöls wird in einem weiteren Wärmetauscher ein Kältemittel aufgeheizt, das seinerseits eine Gasturbine antreibt. Das Kältemittel kann nach Bedarf gewählt werden, je nach Temperaturniveau des Abgases. Diese Lösung des Standes der Technik erscheint noch am vielversprechendsten. Auch sie wird oftmals jedoch nicht eingesetzt, da auch sie nicht wirtschaftlich ist. Vorteilhaft bei dieser Lösung ist zwar, dass kein Dampfkreislauf installiert werden muss. Nachteilig ist jedoch, dass das Thermoöl verwendet werden muss. Ein Thermoöl wird jedoch bei Temperaturen oberhalb von ca. 300 °C chemisch zersetzt. Daher ist die Anwendung dieser Technik prinzipbedingt auf Abgase von maximal ca. 300 °C beschränkt.

45 **[0007]** Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, Möglichkeiten zu schaffen, mittels derer die Rückgewinnung von Energie aus der Abwärme des industriellen technischen Prozesses, d.h. aus der Wärme des heißen Abgases der Hauptanlage, verbessert werden kann.

[0008] Die Aufgabe wird durch ein System zur Rückgewinnung von Energie mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen des Systems sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche 2 bis 14.

[0009] Erfindungsgemäß wird ein System zur Rückgewinnung von Energie der eingangs genannten Art dadurch ausgestaltet,

- 50
- dass das System eine Anzahl von Kompressoren aufweisende Kompressoranzordnung aufweist, mittels derer der Kompressoranzordnung zugeführte, eine Anfangstemperatur aufweisende Luft von einem Anfangsdruck auf einen Enddruck und eine Zwischentemperatur komprimiert wird,
 - dass das System einen der Kompressoranzordnung nachgeordneten Wärmetauscher aufweist, der von der auf den Enddruck und die Zwischentemperatur komprimierten Luft durchströmt wird und mittels dessen der den Wärmetauscher durchströmenden Luft die Wärme des die Abführeinrichtung durchströmenden Abgases zugeführt wird und so die Luft auf eine Endtemperatur erwärmt wird, und
 - dass das System einen dem Wärmetauscher nachgeordneten Druckluftmotor aufweist, dem die auf die Endtempe-
- 55

ratur erwärmte und den Enddruck aufweisende Luft zugeführt wird, der mit dieser Luft betrieben wird und von dem die Luft mit einer Abgabetemperatur und einem Abgabedruck abgegeben wird.

[0010] Die Hauptanlage kann nach Belieben ausgebildet sein, sofern sie das heiße Abgas generiert. Oftmals ist die Hauptanlage eine Anlage der Stahlindustrie, insbesondere ein Brammenofen, ein Hochofen, ein Konverter oder ein Elektrostahlwerk. Die vorliegende Erfindung ist aber nicht auf derartige Anlagen beschränkt.

[0011] In der Regel wird von dem Druckluftmotor ein elektrischer Generator angetrieben, mittels dessen elektrische Energie erzeugt wird. In manchen Fällen kann die von dem Druckluftmotor erzeugte mechanische Energie aber auch anderweitig verwertet werden.

[0012] Vorzugsweise ist die Anzahl an Kompressoren größer als 1 und sind die Kompressoren in Serie hintereinander angeordnet, so dass die Luft, ausgehend von dem Anfangsdruck, in mehreren Stufen auf den Enddruck komprimiert wird. In diesem Fall weist das System vorzugsweise zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Kompressoren angeordnete Kühleinrichtungen auf, mittels derer die von dem der jeweiligen Kühleinrichtung vorgeordneten Kompressor zu dem der jeweiligen Kühleinrichtung nachgeordneten Kompressor geförderte Luft gekühlt wird. Dadurch kann der zum Betreiben der Kompressoren erforderliche Energieaufwand reduziert werden, gleichzeitig die Menge an komprimierter Luft maximiert werden und weiterhin auch die Zwischentemperatur relativ gering gehalten werden. Somit kann die Wärme des heißen Abgases in weit besserem Umfang zum Aufheizen der komprimierten Luft genutzt werden. Gleichzeitig kann das Abgas in stärkerem Umfang gekühlt werden. Das Kühlen der Luft in den Kühleinrichtungen erfolgt in der Regel so weit wie möglich, nach Möglichkeit bis auf die Anfangstemperatur.

[0013] Es ist möglich, dass das System einen weiteren Wärmetauscher aufweist, der in der Abführeinrichtung angeordnet ist und mittels dessen die Wärme des Abgases auf ein Zwischenmedium übertragen wird, und das Zwischenmedium direkt oder indirekt auf den die Luft aufheizenden Wärmetauscher wirkt. Das Zwischenmedium kann beispielsweise ein Thermoöl sein. Die Verwendung des weiteren Wärmetauschers bietet sich insbesondere dann an, wenn das Abgas eine Temperatur von 300 °C oder weniger aufweist.

[0014] Im Falle der Verwendung des weiteren Wärmetauschers und des Zwischenmediums besteht eine vorteilhafte Ausgestaltung darin, dass das System einen Wärmespeicher aufweist, dass der Wärmetauscher zumindest im oberen Bereich des Wärmespeichers angeordnet ist und vorzugsweise die den Wärmetauscher durchströmende Luft den Wärmespeicher von unten nach oben durchströmt und dass zumindest im unteren Bereich des Wärmespeichers eine Wärmeabgabeeinrichtung angeordnet ist und vorzugsweise das Zwischenmedium den Wärmespeicher von oben nach unten durchströmt, so dass das Zwischenmedium über die Wärmeabgabeeinrichtung Wärme in den Wärmespeicher einbringt.

[0015] Aufgrund des Wärmespeichers kann insbesondere eine gewisse Pufferkapazität bereitgestellt werden, so dass trotz variierender Mengen des heißen Abgases ein gleichmäßiger Betrieb des Druckluftmotors erreicht werden kann.

[0016] Es ist möglich, dass die Wärmeabgabeeinrichtung schlichtweg ein Speiserohr ist, über das das Zwischenmedium in den Wärmespeicher eingespeist wird. In diesem Fall befindet sich im Wärmespeicher ein Teil des Zwischenmediums. Das Zwischenmedium und das Speichermedium des Wärmespeichers sind in diesem Fall ein und dasselbe Medium. Alternativ kann es sich bei der Wärmeabgabeeinrichtung um einen (weiteren) Wärmetauscher handeln, so dass das Medium des Wärmespeichers vom Zwischenmedium getrennt ist.

[0017] Alternativ ist es möglich, dass der Wärmetauscher in der Abführeinrichtung angeordnet ist, so dass die Wärme des Abgases direkt auf den Wärmetauscher übertragen wird. Diese Lösung ist insbesondere dann von Vorteil, wenn das Abgas eine Temperatur oberhalb von 300 °C aufweist. Denn bei derartigen Temperaturen sind übliche Zwischenmedien, beispielsweise ein Thermoöl, oftmals nicht mehr stabil.

[0018] Vorzugsweise weist das System einen Druckluftspeicher auf, der zwischen dem Wärmetauscher und dem Druckluftmotor angeordnet ist. Dadurch kann - innerhalb der Kapazität des Druckluftspeichers - Druckluft auf Vorrat erzeugt und gespeichert werden. Der Betrieb des Druckluftmotors kann somit vergleichmäßig werden.

[0019] In einer besonders einfachen Ausgestaltung wird die der Kompressoranordnung zugeführte Luft der Umgebung entnommen. Dadurch ist einseitig der Kompressoranordnung kein Druckluftspeicher erforderlich. Auch ist keine Vorkomprimierung der Luft erforderlich. Es kann jedoch erforderlich sein, die Luft vor dem Zuführen zu der Kompressoranordnung zu reinigen. In analoger Weise wird in einer besonders einfachen Ausgestaltung auch die von dem Druckluftmotor abgegebene Luft in die Umgebung abgegeben.

[0020] Vorzugsweise weist das System eine Regeleinrichtung auf, mittels derer die Kompressoranordnung und/oder der Druckluftmotor derart geregelt werden, dass die Abgabetemperatur und der Abgabedruck zumindest näherungsweise mit dem Anfangsdruck und der Anfangstemperatur übereinstimmen. Dadurch kann der resultierende Wirkungsgrad der Gesamtanordnung optimiert werden.

[0021] Die Kompressoren der Kompressoranordnung können nach Bedarf ausgebildet sein. In manchen Fällen kann es möglich sein, dass die Kompressoranordnung als Kompressoren Gasturbinen aufweist. Oftmals sind jedoch andere Ausgestaltungen vorteilhafter.

[0022] Beispielsweise können die Kompressoren jeweils wie folgt ausgebildet sein:

- die Kompressoren weisen eine erste und eine zweite Welle auf, deren Wellenachsen mit einem seitlichen Versatz parallel zueinander angeordnet sind und die im Betrieb synchron und mit gleicher Drehzahl rotieren, so dass die beiden Wellen aneinander abrollen und gegeneinander luftdicht abgedichtet sind,
- die Kompressoren weisen ein Gehäuse auf, das die erste Welle ringförmig umgibt,
- die erste Welle weist auf ihrer Außenseite eine Nase auf, die abdichtend an dem Gehäuse umläuft,
- die zweite Welle weist auf ihrer Außenseite eine Ausnehmung auf, in welche die Nase der ersten Welle beim Rotieren der Wellen temporär eintaucht und aus dem die Nase der ersten Welle sich später wieder löst,
- in dem Gehäuse sind eine Zuführöffnung und eine Auslassöffnung angeordnet, die in Drehrichtung der ersten Welle gesehen von der Nase kurz nach dem Lösen aus der Ausnehmung bzw. kurz vor dem Eintauchen in die Ausnehmung passiert werden, so dass die Nase einen von der ersten Welle und dem umgebenden Gehäuse gebildeten jeweiligen Hohlraum in einen ersten und in einen zweiten Abschnitt unterteilt, wobei der erste Abschnitt sich von der Winkelposition, an der die Nase der ersten Welle sich von der Ausnehmung der zweiten Welle löst, bis zur momentanen Winkelposition der Nase erstreckt und der zweite Abschnitt sich von der momentanen Position der Nase bis zu der Winkelposition erstreckt, an der die Nase der ersten Welle in die Ausnehmung der zweiten Welle eintaucht,
- die Einlassöffnung ist permanent geöffnet, so dass dem ersten Abschnitt kontinuierlich Luft zugeführt wird,
- über die Auslassöffnung wird die komprimierte Luft abgegeben,
- der Auslassöffnung ist eine Schließvorrichtung zugeordnet, von der die Auslassöffnung während einer Zeitspanne, in der sich die Nase kurz vor dem Eintauchen der Nase der ersten Welle in die Ausnehmung der zweiten Welle befindet, kurzzeitig geöffnet und danach wieder geschlossen wird.

[0023] Das Öffnen und Schließen der Auslassöffnung kann durch die Formgebung der ersten und der zweiten Welle erreicht werden. Solange die Auslassöffnung geöffnet ist, kann die komprimierte Luft dem jeweiligen Kompressor entnommen werden.

[0024] Eine derartige Ausgestaltung eines Kompressors ist an sich bekannt. Insbesondere sind die Verdichterteile eines Astronmotors derart ausgebildet. Astronmotoren sind ausführlich beispielsweise in der US 2021/0 040 885 A1, der US 10 844 782 B1, der US 2022/0 056 802 A1 und der US 2023/0 092 617 A1 beschrieben.

[0025] Besonders vorteilhaft ist es jedoch, wenn die Kompressoren als Schraubenverdichter ausgebildet sind. Schraubenverdichter sind Fachleuten allgemein bekannt. Rein beispielhaft kann auf den Eintrag "Zahnradpumpe" und den dortigen Abschnitt "Schraubenpumpe" in der deutschen Wikipedia, abgerufen am 05.05.2023, verwiesen werden. Schraubenverdichter sind auch käuflich am Markt erhältlich. Typischerweise weist ein Schraubenverdichter zwei gegenläufig rotierende Wellen auf, die zwischen sich Luft in einer Kammer einschließen. Die Kammer bewegt sich bei Drehung der beiden Wellen in Axialrichtung, wobei eine Verringerung des Kammervolumens auftritt.

[0026] Auch der Druckluftmotor kann nach Bedarf ausgebildet sein. Beispielsweise kann der Druckluftmotor als Gasturbine ausgebildet sein. Ebenso kann der Druckluftmotor wie folgt ausgebildet sein:

- der Druckluftmotor weist eine erste und eine zweite Welle auf, deren Wellenachsen mit einem seitlichen Versatz parallel zueinander angeordnet sind und die im Betrieb synchron und mit gleicher Drehzahl rotieren, so dass die beiden Wellen aneinander abrollen und gegeneinander luftdicht abgedichtet sind,
- der Druckluftmotor weist ein Gehäuse auf, das die erste Welle ringförmig umgibt,
- die erste Welle weist auf ihrer Außenseite eine Nase auf, die abdichtend an dem Gehäuse umläuft,
- die zweite Welle weist auf ihrer Außenseite eine Ausnehmung auf, in welche die Nase der ersten Welle beim Rotieren der Wellen temporär eintaucht und aus dem die Nase der ersten Welle sich später wieder löst,
- in dem Gehäuse sind eine Zuführöffnung und eine Auslassöffnung angeordnet, die in Drehrichtung der ersten Welle gesehen von der Nase kurz nach dem Lösen aus der Ausnehmung bzw. kurz vor dem Eintauchen in die Ausnehmung passiert werden, so dass die Nase einen von der ersten Welle und dem umgebenden Gehäuse gebildeten ringförmigen Hohlraum in einen ersten und in einen zweiten Abschnitt unterteilt, wobei der erste Abschnitt sich von der Winkelposition, an der die Nase der ersten Welle sich von der Ausnehmung der zweiten Welle löst, bis zur momentanen Winkelposition der Nase erstreckt und der zweite Abschnitt sich von der momentanen Position der Nase bis zu der Winkelposition erstreckt, an der die Nase der ersten Welle in die Ausnehmung der zweiten Welle eintaucht,
- der Zuführöffnung ist eine Schließvorrichtung zugeordnet, von der die Zuführöffnung während einer Zeitspanne, in der sich die Nase kurz nach dem Lösen der Nase der ersten Welle aus der Ausnehmung der zweiten Welle befindet, kurzzeitig geöffnet und danach wieder geschlossen wird, so dass dem ersten Abschnitt temporär komprimierte Luft zugeführt wird,
- die Auslassöffnung ist permanent geöffnet, so dass die Luft über die Auslassöffnung kontinuierlich abgegeben wird.

[0027] Dieser Aufbau entspricht im Kern dem Motorteil eines Astronmotors. Ein derartiger Druckluftmotor ist im Prinzip invers zum Verdichterteil eines Astronmotors ausgebildet.

[0028] Besonders vorteilhaft ist es jedoch, wenn der Druckluftmotor als Schraubenmotor ausgebildet ist. Schrauben-

motoren sind Fachleuten allgemein bekannt. Rein beispielhaft kann auf die Doktorarbeit "Grundlagen des Zweiphasen-Schraubenmotors" von Bernhard Paul Kliem, Fakultät Maschinenbau der Universität Dortmund (Deutschland) verwiesen werden. Prinzipiell ist ein Schraubenmotor invers zu einem Schraubenverdichter aufgebaut. Typischerweise weist ein Schraubenmotor zwei gegenläufig rotierende Wellen auf, die zwischen sich Luft in einer Kammer einschließen. Die Kammer bewegt sich bei Drehung der beiden Wellen in Axialrichtung, wobei eine Vergrößerung des Kammervolumens auftritt.

[0029] In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung des Systems weist das System eine elektrische Maschine auf, die ihrerseits ein Gehäuse aufweist, in dem koaxial zueinander eine erste und eine zweite Welle gelagert sind. Die erste und die zweite Welle tragen bei dieser Ausgestaltung jeweils ein Aktivteil der elektrischen Maschine, so dass zwischen den beiden Aktivteilen eine elektromotorische Kraft wirken kann. Die erste Welle ist bei dieser Ausgestaltung mit dem Druckluftmotor verbunden, die zweite Welle mit den Kompressoren der Kompressoranzordnung. Die elektrische Maschine wirkt somit als elektrische Differenzmaschine.

[0030] Diese Ausgestaltung weist den besonderen Vorteil auf, dass - anstelle eines mit dem Druckluftmotor verbundenen elektrischen Generators und (mindestens) eines mit den Kompressoren verbundenen Elektromotors nur eine einzige elektrische Maschine erforderlich ist, die darüber hinaus kleiner ausgelegt werden kann als dies bei den beiden einzelnen elektrischen Maschinen (Generator und Motor) erforderlich wäre.

[0031] Die letztgenannte Ausgestaltung kann dadurch noch weiter verbessert werden, dass das System eine weitere elektrische Maschine aufweist, deren Stator drehfest angeordnet ist und deren Rotor mit dem Druckluftmotor oder den Kompressoren der Kompressoranzordnung verbunden ist. Dadurch können der Betrieb des Druckluftmotors und der Betrieb der Kompressoranzordnung innerhalb der Leistungsgrenzen der weiteren elektrischen Maschine voneinander entkoppelt werden. Die weitere elektrische Maschine kann oftmals erheblich kleiner als die erstgenannte elektrische Maschine dimensioniert werden, beispielsweise um eine Größenordnung (= Faktor 10) kleiner.

[0032] In einer weiter bevorzugten Ausgestaltung weist das System mindestens eine Zapfstelle auf, an welcher der Kompressoranzordnung Luft entnommen werden kann, wobei die der Kompressoranzordnung entnommene Luft einen Entnahmedruck aufweist, der größer als der Anfangsdruck und maximal so groß wie der Enddruck ist. Dadurch ist eine eigenständige Generierung von Druckluft für die Hauptanlage nicht erforderlich. Gegebenenfalls kann auch ein bestehendes Druckluftsystem der Hauptanlage so umgebaut und nachgerüstet werden, dass es ein erfindungsgemäßes System bildet.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0033] Die oben beschriebenen Eigenschaften, Merkmale und Vorteile dieser Erfindung sowie die Art und Weise, wie diese erreicht werden, werden klarer und deutlicher verständlich im Zusammenhang mit der folgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels, das im Zusammenhang mit den Zeichnungen näher erläutert wird. Dabei zeigen:

- FIG 1 eine Hauptanlage und eine Rückgewinnungseinrichtung,
- FIG 2 einen strukturellen Aufbau einer Rückgewinnungseinrichtung,
- FIG 3 eine Hauptanlage und einen Wärmetauscher,
- FIG 4 eine Struktur zur Wärmeübertragung,
- FIG 5 eine Regelstruktur,
- FIG 6 eine Kompressoranzordnung, einen Druckluftmotor und eine elektrische Maschine,
- FIG 7 eine Abwandlung von FIG 6 und
- FIG 8 eine weitere Abwandlung von FIG 6.

Beschreibung der Ausführungsformen

[0034] Gemäß FIG 1 weist ein System zur Rückgewinnung von Energie eine Hauptanlage 1 auf. Beim Betrieb der Hauptanlage 1 entsteht ein heißes Abgas 2. Das heiße Abgas 2 durchströmt eine Abführeinrichtung 3 der Hauptanlage 1 und wird so aus der Hauptanlage 1 abgeführt. Die Hauptanlage 1 ist oftmals eine Anlage der Stahlindustrie, beispielsweise ein Brammenofen oder ein Elektrostahlwerk. Die vorliegende Erfindung ist aber nicht auf Anlagen der Stahlindustrie beschränkt.

[0035] Das System weist weiterhin weitere Anlagenkomponenten auf, mittels derer die thermische Energie des heißen Abgases 2, also die Abwärme der Hauptanlage 1, zur Erzeugung zunächst von mechanischer und in der Regel hierauf aufbauend von elektrischer Energie verwertet werden soll. Die weiteren Anlagenkomponenten in ihrer Gesamtheit werden nachstehend als Rückgewinnungseinrichtung 4 bezeichnet. Die Rückgewinnungseinrichtung 4 ist an das heiße Abgas 2, das die Abführeinrichtung 3 durchströmt, thermisch angekoppelt. Die thermische Ankopplung ist in FIG 1 durch einen Doppelpfeil 5 angedeutet. Der strukturelle Aufbau der Rückgewinnungseinrichtung 4 wird in Verbindung mit FIG 2 erläutert.

[0036] Gemäß FIG 2 weist die Rückgewinnungseinrichtung 4 eine Kompressoranordnung 6 auf. Mittels der Kompressoranordnung 6 wird Luft 7, die der Kompressoranordnung 6 mit einer Anfangstemperatur T_1 und einem Anfangsdruck p_1 zugeführt wird, auf einen Enddruck p_2 und eine Zwischentemperatur T_c komprimiert. Die Kompressoranordnung 6 weist zu diesem Zweck eine Anzahl von Kompressoren 8 auf.

[0037] Die Anzahl an Kompressoren 8 kann nach Bedarf sein. In vielen Fällen ist die Anzahl an Kompressoren 8 größer als 1. In diesem Fall sind die Kompressoren 8 in Serie hintereinander angeordnet. Die in FIG 2 dargestellte Anzahl von drei Kompressoren 8 ist nur beispielhaft. Aufgrund der Anordnung der Kompressoren 8 in Serie wird die Luft 7 mittels der Kompressoren 8, ausgehend von dem Anfangsdruck p_1 , in mehreren Stufen auf den Enddruck p_2 komprimiert. Gemäß dem Ausführungsbeispiel komprimiert der vorderste Kompressor 8 die Luft 7 ausgehend vom Anfangsdruck p_1 , auf den Zwischendruck p_a . Ausgangsseitig dieses Kompressors 8 weist die Luft 7 die Temperatur T_a auf. Die Temperatur T_a ist größer als die Anfangstemperatur T_1 . In analoger Weise komprimiert der mittlere Kompressor 8 die Luft 7, ausgehend vom Zwischendruck p_a , auf den Zwischendruck p_b . Ausgangsseitig dieses Kompressors 8 weist die Luft 7 die Temperatur T_b auf. In analoger Weise komprimiert der letzte Kompressor 8 die Luft 7, ausgehend vom Zwischendruck p_b , auf den Enddruck p_2 . Ausgangsseitig dieses Kompressors 8 weist die Luft 7 die Zwischentemperatur T_c auf. Somit entstehen innerhalb der Kette von Kompressoren 8 mehrere Drücke p_a , p_b .

[0038] Im Falle mehrerer Kompressoren 8 weist das System entsprechend der Darstellung in FIG 2 vorzugsweise weiterhin Kühleinrichtungen 9 auf, die zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Kompressoren 8 angeordnet sind. Mittels der Kühleinrichtungen 9 wird die Luft 7 gekühlt, die von dem der jeweiligen Kühleinrichtung 9 vorgeordneten Kompressor 8 zu dem der jeweiligen Kühleinrichtung 9 nachgeordneten Kompressor 8 gefördert wird. Nach Möglichkeit erfolgt ein Abkühlen jeweils bis auf die Anfangstemperatur T_1 . Zum Kühlen der Luft 7 kann ein nahezu beliebiges Kühlmedium dienen, beispielsweise Kühlwasser, das für die Kühlung eines Walzguts nach dem Durchlaufen einer Walzstraße verwendet wird.

[0039] Das System weist weiterhin einen Wärmetauscher 10 auf. Der Wärmetauscher 10 ist der Kompressoranordnung 6 nachgeordnet. Der Wärmetauscher 10 wird von der Luft 7, die bereits den Enddruck p_2 , aber noch die Zwischentemperatur T_c aufweist, durchströmt. Mittels des Wärmetauschers 10 wird der den Wärmetauscher 10 durchströmenden Luft 7 die Wärme des Abgases 2 zugeführt, das die Abführeinrichtung 3 durchströmt. Dadurch wird die Luft 7 auf eine Endtemperatur T_2 erwärmt.

[0040] Schließlich weist das System einen Druckluftmotor 11 auf. Der Druckluftmotor 11 ist dem Wärmetauscher 10 nachgeordnet. Dem Druckluftmotor 11 wird die Luft 7 zugeführt, die zu diesem Zeitpunkt auf die Endtemperatur T_2 erwärmt ist und weiterhin den Enddruck p_2 aufweist. Somit wird der Druckluftmotor 11 mit dieser Luft 7 betrieben. Von dem Druckluftmotor 11 wird die Luft 7 mit einer Abgabetemperatur T_3 und einem Abgabedruck p_3 abgegeben.

[0041] Mittels des Druckluftmotors 11 wird zunächst mechanische Energie erzeugt. In vielen Fällen ist der Druckluftmotor 11 jedoch mit einer elektrischen Maschine 12 gekuppelt, die dadurch generatorisch betrieben wird. Die von der elektrischen Maschine 12 erzeugte elektrische Energie kann somit - beispielsweise über einen Umrichter 13 - in ein elektrisches Netz 14 eingespeist werden.

[0042] FIG 2 zeigt nicht nur die vorstehend erläuterte minimale Ausgestaltung der Rückgewinnungseinrichtung 4, sondern zugleich auch einige Ausgestaltungen. Diese Ausgestaltungen sind unabhängig voneinander realisierbar.

[0043] Eine Ausgestaltung besteht darin, dass das System einen Druckluftspeicher 15 aufweist. Der Druckluftspeicher 15 ist zwischen dem Wärmetauscher 10 und dem Druckluftmotor 11 angeordnet. Dem Druckluftspeicher 15 wird die auf die Endtemperatur T_2 erwärmte und den Enddruck p_2 aufweisende Luft 7 zugeführt. Von dem Druckluftspeicher 15 aus wird die auf die Endtemperatur T_2 erwärmte und den Enddruck p_2 aufweisende Luft 7 dem Druckluftmotor 11 zugeführt.

[0044] Eine weitere Ausgestaltung besteht darin, dass die der Kompressoranordnung 6 zugeführte Luft 7 der Umgebung entnommen wird. Die der Kompressoranordnung 6 zugeführte Luft 7 weist somit vor dem Komprimieren in der Kompressoranordnung 6 als Anfangsdruck p_1 den normalen Luftdruck von ca. 100.000 Pa und als Anfangstemperatur T_1 eine ortsübliche Temperatur auf, die je nach Tageszeit und Jahreszeit beispielsweise zwischen $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ variieren kann.

[0045] Eine weitere Ausgestaltung besteht darin, dass die von dem Druckluftmotor 11 abgegebene Luft 7 in die Umgebung abgegeben wird.

[0046] Eine weitere Ausgestaltung besteht darin, dass das System mindestens eine Zapfstelle 16 aufweist. An den Zapfstellen 16 kann der Kompressoranordnung 6 Luft 7 entnommen werden. Die Zapfstellen 16 können beispielsweise als Ventile ausgebildet sein. Die entnommene Luft 7 weist einen Entnahmedruck auf, der größer als der Anfangsdruck p_1 und maximal so groß wie der Enddruck p_2 ist. Entsprechend der Darstellung in FIG 2 kann der Kompressoranordnung 6 beispielsweise Luft 7 mit dem Zwischendruck p_a , Luft 7 mit dem Zwischendruck p_b und Luft 7 mit dem Enddruck p_2 entnommen werden.

[0047] Zum Zuführen der Wärme des Abgases 2 zur Luft 7 sind verschiedene Ausgestaltungen möglich. Die einfachste Ausgestaltung besteht darin, dass entsprechend der Darstellung in FIG 3 der Wärmetauscher 10 in der Abführeinrichtung 3 angeordnet ist, so dass der Wärmetauscher 10 direkt von dem Abgas 2 umströmt wird und somit die Wärme des Abgases 2 direkt auf den Wärmetauscher 10 übertragen wird.

[0048] Alternativ ist es entsprechend der Darstellung in FIG 4 möglich, dass das System einen weiteren Wärmetauscher 17 aufweist, der in der Abführeinrichtung 3 angeordnet ist und von dem Abgas 2 umströmt wird. In diesem Fall wird die Wärme des Abgases 2 zunächst auf ein Zwischenmedium 18 übertragen, das den weiteren Wärmetauscher 17 durchströmt. In diesem Fall wirkt das Zwischenmedium 18 auf den Wärmetauscher 10, also denjenigen Wärmetauscher, der von der Luft 7 durchströmt wird und mittels dessen die Luft 7 aufgeheizt wird. Die Wirkung kann direkt sein. Dies ist in FIG 4 nicht dargestellt. Dargestellt ist hingegen eine vorteilhafte Ausgestaltung, bei welcher das Zwischenmedium 18 indirekt auf den die Luft 7 aufheizenden Wärmetauscher 10 wirkt. Das Zwischenmedium 18 kann beispielsweise ein Thermoöl sein.

[0049] Bei dieser vorteilhaften Ausgestaltung weist das System einen Wärmespeicher 19 auf. In dem Wärmespeicher 19 befindet sich ein geeignetes Speichermedium 20. In diesem Fall ist der Wärmetauscher 10 zumindest im oberen Bereich des Wärmespeichers 19 angeordnet. Noch besser ist es, wenn der Wärmetauscher 10 sich in Höhenrichtung über einen nennenswerten Höhenbereich des Wärmespeichers 19 erstreckt. In diesem Fall durchströmt die Luft 7 den Wärmetauscher 10 und damit den Wärmespeicher 19 von unten nach oben. Weiterhin ist zumindest im unteren Bereich des Wärmetauschers 19 eine Wärmeabgabeeinrichtung 21 angeordnet. Mittels der Wärmeabgabeeinrichtung 21 bringt das Zwischenmedium 18 die Wärme in den Wärmespeicher 19 bzw. in das Speichermedium 20 ein. Noch besser ist es, wenn die Wärmeabgabeeinrichtung 21 sich in Höhenrichtung über einen nennenswerten Höhenbereich des Wärmespeichers 19 erstreckt. In diesem Fall durchströmt das Zwischenmedium 18 die Wärmeabgabeeinrichtung 21 und damit den Wärmespeicher 19 von oben nach unten. Auch das Speichermedium 20 kann ein Thermoöl sein.

[0050] Die Wärmeabgabeeinrichtung 21 ist in FIG 4 als (weiterer) Wärmetauscher dargestellt, so dass das Zwischenmedium 18 von dem Speichermedium 20 getrennt ist. Sofern das Zwischenmedium 18 und das Speichermedium 20 gleichartig sind, kann die Wärmeabgabeeinrichtung 21 jedoch auch als einfaches Rohr ausgebildet sein, das im Wärmespeicher 19 mündet. In diesem Fall führt - selbstverständlich - ein weiteres Rohr auch wieder vom Wärmespeicher 19 zurück zu dem Wärmetauscher 17.

[0051] Während der Komprimierungsvorgänge in den Kompressoren 8 der Kompressoranordnung 6 erwärmt sich die Luft 7. Dies ist unvermeidlich. Zur Minimierung der zum Komprimieren der Luft 7 erforderlichen mechanischen Energie (und damit im Regelfall auch elektrischen Energie) erfolgt das Komprimieren der Luft 7 jedoch entsprechend der Darstellung in FIG 2 vorzugsweise stufenweise, wobei die Luft 7 zwischen den einzelnen Komprimierungsvorgängen immer wieder abgekühlt wird. Weiterhin dehnt sich die Luft 7 im Druckluftmotor 11 aus und kühlt dabei ab. Auch dies ist unvermeidlich. Im Druckluftmotor 11 erfolgt weiterhin in der Regel eine adiabatische Expandierung der Luft 7. Wenn mit V2 das Volumen an Luft 7 bezeichnet wird, das dem Druckluftmotor 11 für einen einzelnen Arbeitszyklus mit dem Enddruck p2 zugeführt wird, und mit V3 das Volumen an Luft 7 bezeichnet wird, das von dem Druckluftmotor 11 nach diesem Arbeitszyklus, also nach dem Expandieren, abgegeben wird, gilt in sehr guter Näherung die Beziehung

$$(V2/V3)^{1,4} = (T3/T2)^{3,5} = p3/p2. \quad (1)$$

[0052] Die Luft 7 wird von dem Druckluftmotor 11 in aller Regel an ein Reservoir (das kann auch die normale Umgebung sein) abgegeben, in welcher die Anfangstemperatur T1 und der Anfangsdruck p1 herrschen. Im Idealfall sollte daher die Beziehung

$$(V2/V3)^{1,4} = (T1/T2)^{3,5} = p1/p2. \quad (2)$$

erfüllt werden. Anders ausgedrückt: Im Idealfall stimmen die Abgabetemperatur T3 und der Abgabedruck p3 zumindest näherungsweise mit dem Anfangsdruck p1 und der Anfangstemperatur T1 überein:

$$p3 = p1 \quad \text{und} \quad T3 = T1. \quad (3)$$

[0053] Im Idealfall sind die Betriebsweise der Kompressoranordnung 6 und die Betriebsweise des Druckluftmotors 11 somit derart aufeinander abgestimmt, dass die Luft 7 zu dem Zeitpunkt, zu dem sie aus dem Druckluftmotor 11 austritt, genau auf den Druck und die Temperatur zurückgeführt sind, mit dem der Kreislauf geschlossen wird, also auf den Anfangsdruck p1 und die Anfangstemperatur T1. Der vorstehend erwähnte Zeitpunkt ist derjenige Zeitpunkt, zu dem der Übergang von der Expandierung der im Druckluftmotor 11 befindlichen Luft 7 zum Abgeben der im Druckluftmotor 11 befindlichen Luft 7 erfolgt.

[0054] Vorzugsweise weist das System entsprechend der Darstellung in FIG 5 eine Regeleinrichtung 22 auf, mittels derer die Kompressoranordnung 6 und/oder der Druckluftmotor 11 derart geregelt werden, dass diese Bedingung - im Rahmen des möglichen - erfüllt ist, dass also die Abgabetemperatur T3 und der Abgabedruck p3 zumindest näherungs-

weise mit dem Anfangsdruck p_1 und der Anfangstemperatur T_1 übereinstimmen. Dadurch kann der Wirkungsgrad optimiert werden.

[0055] Der Regeleinrichtung 22 werden gemäß FIG 5 als Eingangsgrößen die Anfangstemperatur T_1 und die Endtemperatur T_2 und der Anfangsdruck p_1 zugeführt. Denn diese Größen müssen so hingenommen werden, wie sie sind.

[0056] Die Regeleinrichtung 22 steuert - soweit möglich - zunächst das Verhältnis der Volumina V_2 und V_3 , so dass das Verhältnis eine vorbestimmte, vom Verhältnis der Temperaturen T_1 und T_2 abhängige Bedingung erfüllt, beispielsweise die Bedingung gemäß obiger Gleichung. Nun können zwar die Volumina V_2 und V_3 eines einmal gebauten Druckluftmotors 11 nicht mehr verändert werden. Es ist aber möglich, beispielsweise mehrere Druckluftmotoren 11, bei denen sich die Verhältnisse der Volumina V_2 und V_3 jeweils voneinander unterscheiden, parallel anzuordnen und über die Ansteuerung von vorgeordneten Ventilen festzulegen, welcher der Druckluftmotoren 11 aktiv ist. In analoger Weise kann es auch möglich sein, mehrere Druckluftmotoren 11 in Serie hintereinander anzuordnen und die Möglichkeit vorzusehen, einen oder mehrere der Druckluftmotoren 11 aus der Serie auszukoppeln (zu überbrücken), um das (resultierende) Verhältnis der Volumina V_2 und V_3 zu optimieren.

[0057] Ein derartiges Variieren des Verhältnisses der Volumina V_2 und V_3 ist auch von erheblicher Bedeutung für einen optimalen Betrieb. Wenn - beispielsweise - die Endtemperatur T_2 bei 300 °C bzw. 573 K liegt und die Anfangstemperatur T_1 (d.h. die Umgebungstemperatur) zwischen -20 °C und +40 °C schwanken kann, so liegt das optimale Verhältnis der Volumina V_2 und V_3 zwischen 7,72 und 4,535. In einem derartigen Fall kann beispielsweise für vier Temperaturbereiche von jeweils 15 K jeweils ein eigener Druckluftmotor 11 bereitgestellt werden, wobei die Volumenverhältnisse der Druckluftmotoren 11 bei (etwa) 4,83, 5,47, 6,25 und 7,19 liegen können. Je nach Temperaturbereich wird dann ausgewählt, welcher der Druckluftmotoren 11 aktiv betrieben wird.

[0058] Weiterhin steuert die Regeleinrichtung 22 - gegebenenfalls nach der Festlegung, in welcher Konfiguration der Druckluftmotor 11 betrieben wird - die Kompressoranordnung 6 und/oder den Druckluftmotor 11 derart, dass der Enddruck p_2 eine vorbestimmte, vom Verhältnis der Temperaturen T_1 und T_2 abhängige Bedingung erfüllt, beispielsweise die Bedingung gemäß obiger Gleichung. Beispielsweise können - bezogen auf den Anfangsdruck p_1 - der der Kompressoranordnung 6 zugeführte Volumenstrom und der von dem Druckluftmotor 11 abgegebene Volumenstrom durch Anpassung einer Drehzahl n_K der Kompressoranordnung 6 und/oder einer Drehzahl n_M des Druckluftmotors 11 aufeinander abgestimmt werden, so dass der gewünschte Enddruck p_2 eingestellt wird.

[0059] Unter Zugrundelegung der gleichen Endtemperatur T_2 (300 °C) und der möglichen Anfangstemperatur T_1 liegt das optimale Verhältnis von Enddruck p_2 zu Anfangsdruck p_1 zwischen rund 17,5 und rund 8,3. Da weiterhin auch der Anfangsdruck p_1 (d.h. der Luftdruck in der Umgebung) etwas schwanken kann, sollte der Enddruck p_2 in noch etwas stärkerem Umfang variiert werden können, beispielsweise bei einer Schwankung des Anfangsdruckes p_1 um bis zu 4 % nach oben und unten zwischen 800.000 Pa und 1.820.000 Pa. Das Verhältnis zwischen dem maximal möglichen Enddruck p_2 und dem minimal möglichen Enddruck p_2 liegt somit bei etwas über 2,25. Alternativ wäre es auch möglich, zwar stets einen relativ hohen Enddruck p_2 von beispielsweise 1.820.000 Pa zu generieren, die Luft 7 aber ausgangsseitig des Druckluftmotors 11 gegebenenfalls nicht in die Umgebung, sondern an einen Ort innerhalb der Kompressoranordnung 6 zurückzuspeisen, beispielsweise zwischen den ersten und den mittleren der Kompressoren 8 der Kompressoranordnung 6 von FIG 2.

[0060] Wie bereits erwähnt und auch in FIG 6 dargestellt, ist der Druckluftmotor 11 meist mit einer elektrischen Maschine 12 gekuppelt, so dass der Druckluftmotor 11 die elektrische Maschine 12 zur Erzeugung elektrischer Energie antreibt. Weiterhin werden auch zum Antreiben der Kompressoren 8 elektrische Antriebe benötigt. Dies kann in vorteilhafter Weise gemäß der Darstellung in FIG 6 dadurch erreicht werden, dass die elektrische Maschine 12 ein Gehäuse 23 aufweist, in dem coaxial zueinander eine erste Welle 24 und eine zweite Welle 25 gelagert sind. Die Darstellung in FIG 6, gemäß der die zweite Welle 25 sich an der ersten Welle 24 abstützt und somit indirekt im Gehäuse 23 gelagert ist, ist nur rein beispielhaft.

[0061] Die erste Welle 24 und die zweite Welle 25 tragen jeweils ein Aktivteil 26, 27 der elektrischen Maschine 12. Zwischen den beiden Aktivteilen 26, 27 kann eine elektromotorische Kraft wirken. Die beiden Aktivteile 26, 27 entsprechen somit vom Ansatz her dem Rotor und dem Stator der elektrischen Maschine 12. Aufgrund der Anordnung beider Aktivteile 26, 27 auf den Wellen 24, 25 kann sich jedoch nicht nur der "Rotor" um seine Achse drehen, sondern auch der "Stator". Diese Ausgestaltung kann in vorteilhafter Weise dadurch genutzt werden, dass die erste Welle 24 mit dem Druckluftmotor 11 verbunden ist und die zweite Welle 25 mit den Kompressoren 8 der Kompressoranordnung 6 verbunden ist. Dadurch kann erreicht werden, dass der Druckluftmotor 11 direkt die Kompressoren 8 der Kompressoranordnung 6 antreibt. Eine Wandlung der von dem Druckluftmotor 11 bereitgestellten mechanischen Energie in elektrische Energie und eine weitere Wandlung der elektrischen Energie in mechanische Energie zum Antreiben der Kompressoren 8 entfällt somit. Auch die mit jeder Wandlung verbundenen Verluste können so vermieden werden. Dadurch kann der verbleibende Teil an mechanischer Energie, der von der elektrischen Maschine 12 in elektrische Energie gewandelt werden kann, vergrößert werden.

[0062] Würde die Anordnung, so wie in FIG 6 dargestellt, keine weitere elektrische Maschine aufweisen, so wäre ein entkoppelter Betrieb der Kompressoranordnung 6 und des Druckluftmotors 11 nicht möglich. Um einen derartigen ent-

koppelten Betrieb erreichen zu können, weist das System daher gemäß den Darstellungen der FIG 7 und 8 eine weitere elektrische Maschine 28 auf. Bei dieser elektrischen Maschine 28 ist, wie allgemein üblich, der Stator drehfest angeordnet. Der Rotor der weiteren elektrischen Maschine 28 kann nach Bedarf mit dem Druckluftmotor 11 (FIG 7) oder den Kompressoren 8 der Kompressoranordnung 6 (FIG 8) verbunden sein.

[0063] Die Kompressoren 8 der Kompressoranordnung 6 können nach Bedarf ausgebildet sein. Es ist möglich, dass die Kompressoren 8 als Gasturbinen ausgebildet sind. Besser ist es meist, wenn die Kompressoren 8 als Verdichterteile von Astronmotoren ausgebildet sind. Der Aufbau derartiger Verdichterteile ist in der Beschreibungseinleitung ausführlich erläutert. Noch besser ist es meist, wenn die Kompressoren 8 als Schraubenverdichter ausgebildet sind. Insbesondere Schraubenverdichter erreichen sehr hohe relative Wirkungsgrade von weit über 90 %. Der relative Wirkungsgrad ist definiert als der Quotient zwischen dem tatsächlichen Wirkungsgrad und dem theoretisch möglichen Wirkungsgrad. Wenn - beispielsweise - bei gegebenen Temperaturverhältnissen eine Berechnung gemäß dem Carnotschen Kreisprozess einen Wirkungsgrad von 32 % ergibt und die tatsächliche Maschine einen Wirkungsgrad von 24 % aufweist, beträgt der relative Wirkungsgrad $24\%/32\% = 75\%$.

[0064] Analog zu den Kompressoren 8 kann auch der Druckluftmotor 11 nach Bedarf ausgebildet sein. Beispielsweise kann der Druckluftmotor 11 als Gasturbine ausgebildet sein. Besser ist es meist, wenn der Druckluftmotor 11 als Motorteil eines Astronmotors ausgebildet ist. Der Aufbau eines derartigen Motorteils ist in der Beschreibungseinleitung ausführlich erläutert. Noch besser ist es meist, wenn der Druckluftmotor 11 als Schraubenmotor ausgebildet ist. Insbesondere Schraubenmotoren erreichen sehr hohe relative Wirkungsgrade von weit über 90 %. Der relative Wirkungsgrad ist auf die gleiche Art definiert, wie dies zuvor für Kompressoren 8 erläutert wurde.

[0065] Ein hoher relativer Wirkungsgrad des Druckluftmotors 11 und der Kompressoren 8 ist für einen wirtschaftlichen Betrieb des Systems auch von großer Bedeutung. Denn bei üblichen Anfangs- und Endtemperaturen T_1 , T_2 liegt der absolute Wirkungsgrad des Carnotschen Kreisprozesses bei etwas über 30 %. Jedes Prozent relativer Wirkungsgrad, das beim Betrieb der Kompressoren 8 und beim Betrieb des Druckluftmotors 11 verloren geht, verringert bei üblichen Temperaturverhältnissen den relativen Wirkungsgrad des Gesamtsystems um etwa 4 %. Wenn - beispielsweise - bei idealen, völlig verlustfreien Verhältnissen eine Wärmeleistung von 3,84 MW vorliegt und der Druckluftmotor 11 eine Leistung von 2,83 MW liefert und weiterhin die Kompressoren 8 eine Leistung von 1,66 MW benötigen, kann das System als Nutzleistung

$$2,83 \text{ MW} - 1,66 \text{ MW} = 1,17 \text{ MW} \quad (4)$$

liefern. In der Praxis treten jedoch stets Verluste auf. Beispielsweise treten auf Seiten des Druckluftmotors Reibungsverluste im Druckluftmotor 11 und der elektrischen Maschine 12, elektrische Verluste in der elektrischen Maschine 12 und Wandlerverluste in dem Umrichter 13 auf. In analoger Weise treten zum Antreiben der Kompressoren 8 Reibungsverluste in den Kompressoren 8 und den antreibenden Elektromotoren und elektrische Verluste in den antreibenden Elektromotoren und den zugehörigen speisenden Umrichtern auf. Nachfolgend wird angenommen, dass in beiden Fällen der relative Wirkungsgrad der gesamten jeweiligen Kette 95 % beträgt, was in der Praxis ein sehr guter Wert ist. Bereits bei einem derart noch hohen relativen Wirkungsgrad verringert sich die Nutzleistung bereits auf

$$0,95 \cdot 2,83 \text{ MW} - 1,66 \text{ MW} / 0,95 = 0,94 \text{ MW} \quad (5)$$

[0066] Die Nutzleistung verringert sich also auf ca. 80 % ihres theoretisch möglichen Maximums. Bei einem relativen Wirkungsgrad von 90 % verringert sich die Nutzleistung auf ca. 60 % ihres theoretisch möglichen Maximums, bei einem relativen Wirkungsgrad von 85 % auf ca. 38,5 % und bei 80 % auf nur noch knapp 16 %. Bei einem relativen Wirkungsgrad ca. 76,5 % sinkt die Nutzleistung auf 0 und wird danach negativ. Ein hoher relativer Nutzungsgrad ist daher von großer Bedeutung.

[0067] Die vorliegende Erfindung weist viele Vorteile auf. Zunächst ist die Abwärme der Hauptanlage 1 effizient nutzbar. Aufgrund der Verwendung von Luft 7 als Arbeitsmedium sind weiterhin auch keine besonderen Vorkehrungen gegen ein Entweichen der Luft 7 erforderlich. Denn ein derartiges Entweichen führt zwar zu einer Verminderung des Wirkungsgrades, aber nicht zu einer Umweltbelastung. Die Kompressoren 8 und der Druckluftmotor 11 können einfach und robust aufgebaut sein. Sie können bei geeigneter Auslegung mit einem hohen relativen Wirkungsgrad (deutlich über 90 %) arbeiten.

[0068] Obwohl die Erfindung im Detail durch die bevorzugten Ausführungsbeispiele näher illustriert und beschrieben wurde, so ist die Erfindung nicht durch die offenbarten Beispiele eingeschränkt und andere Variationen können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Schutzzumfang der Erfindung zu verlassen.

Bezugszeichenliste

[0069]

5	1	Hauptanlage
	2	Abgas
	3	Abführeinrichtung
	4	Rückgewinnungseinrichtung
	5	Doppelpfeil
10	6	Kompressoranordnung
	7	Luft
	8	Kompressoren
	9	Kühleinrichtungen
	10, 17	Wärmetauscher
15	11	Druckluftmotor
	12, 28	elektrische Maschinen
	13	Umrichter
	14	elektrisches Netz
	15	Druckluftspeicher
20	16	Zapfstellen
	18	Zwischenmedium
	19	Wärmespeicher
	20	Speichermedium
	21	Wärmeabgabereinrichtung
25	22	Regeleinrichtung
	23	Gehäuse
	24, 25	Wellen
	26, 27	Aktivteile
30	nK, nM	Drehzahlen
	p1, p2, p3, pa, pb	Drücke
	T1, T2, T3, Ta, Tb, Tc	Temperaturen
	V2, V3	Volumina

35

Patentansprüche

1. System zur Rückgewinnung von Energie,

- 40 - wobei das System eine Hauptanlage (1) aufweist, bei deren Betrieb ein heißes Abgas (2) entsteht,
 - wobei die Hauptanlage (1) eine Abführeinrichtung (3) aufweist, welche von dem Abgas (2) durchströmt wird
 und über welche das Abgas (2) aus der Hauptanlage (1) abgeführt wird,
 - wobei das System eine eine Anzahl von Kompressoren (8) aufweisende Kompressoranordnung (6) aufweist,
 mittels derer der Kompressoranordnung (6) zugeführte, eine Anfangstemperatur (T1) aufweisende Luft (7) von
 45 einem Anfangsdruck (p1) auf einen Enddruck (p2) und eine Zwischentemperatur (Tc) komprimiert wird,
 - wobei das System einen der Kompressoranordnung (6) nachgeordneten Wärmetauscher (10) aufweist, der
 von der auf den Enddruck (p2) und die Zwischentemperatur (Tc) komprimierten Luft (7) durchströmt wird und
 mittels dessen der den Wärmetauscher (10) durchströmenden Luft (7) die Wärme des die Abführeinrichtung
 (3) durchströmenden Abgases (2) zugeführt wird und so die Luft (7) auf eine Endtemperatur (T2) erwärmt wird,
 50 und
 - wobei das System einen dem Wärmetauscher (10) nachgeordneten Druckluftmotor (11) aufweist, dem die
 auf die Endtemperatur (T2) erwärmte und den Enddruck (p2) aufweisende Luft (7) zugeführt wird, der mit dieser
 Luft (7) betrieben wird und von dem die Luft (7) mit einer Abgabetemperatur (T3) und einem Abgabedruck (p3)
 abgegeben wird.

55

- 2. System nach Anspruch 1,**
dadurch gekennzeichnet,
dass die Anzahl an Kompressoren (8) größer als 1 ist und die Kompressoren (8) in Serie hintereinander angeordnet

sind, so dass die Luft (7), ausgehend von dem Anfangsdruck (p_1), in mehreren Stufen auf den Enddruck (p_2) komprimiert wird, und dass das System zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Kompressoren (8) angeordnete Kühleinrichtungen (11) aufweist, mittels derer die von dem der jeweiligen Kühleinrichtung (11) vorgeordneten Kompressor (8) zu dem der jeweiligen Kühleinrichtung (11) nachgeordneten Kompressor (8) geförderte Luft (7) gekühlt wird.

3. System nach Anspruch 1 oder 2,

dadurch gekennzeichnet,

dass das System einen weiteren Wärmetauscher (17) aufweist, der in der Abführeinrichtung (3) angeordnet ist und mittels dessen die Wärme des Abgases (2) auf ein Zwischenmedium (18) übertragen wird, und dass das Zwischenmedium (18) direkt oder indirekt auf den die Luft (7) aufheizenden Wärmetauscher (10) wirkt.

4. System nach Anspruch 3,

dadurch gekennzeichnet,

dass das System einen Wärmespeicher (19) aufweist, dass der Wärmetauscher (10) zumindest im oberen Bereich des Wärmespeichers (19) angeordnet ist und vorzugsweise die den Wärmetauscher (10) durchströmende Luft (7) den Wärmespeicher (19) von unten nach oben durchströmt und dass zumindest im unteren Bereich des Wärmespeichers (19) eine Wärmeabgabereinrichtung (21) angeordnet ist und vorzugsweise das Zwischenmedium (18) den Wärmespeicher (19) von oben nach unten durchströmt, so dass das Zwischenmedium (18) über die Wärmeabgabereinrichtung (21) Wärme in den Wärmespeicher (19) einbringt.

5. System nach Anspruch 1 oder 2,

dadurch gekennzeichnet,

dass der Wärmetauscher (10) in der Abführeinrichtung (3) angeordnet ist, so dass die Wärme des Abgases (2) direkt auf den Wärmetauscher (10) übertragen wird.

6. System nach einem der obigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass das System einen Druckluftspeicher (15) aufweist, der zwischen dem Wärmetauscher (10) und dem Druckluftmotor (11) angeordnet ist.

7. System nach einem der obigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass die der Kompressoranordnung (6) zugeführte Luft (7) der Umgebung entnommen wird.

8. System nach einem der obigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass die von dem Druckluftmotor (11) abgegebene Luft (7) in die Umgebung abgegeben wird.

9. System nach einem der obigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass das System eine Regeleinrichtung (22) aufweist, mittels derer die Kompressoranordnung (6) und/oder der Druckluftmotor (11) derart geregelt werden, dass die Abgabetemperatur (T_3) und der Abgabedruck (p_3) zumindest näherungsweise mit dem Anfangsdruck (p_1) und der Anfangstemperatur (T_1) übereinstimmen.

10. System nach einem der obigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Kompressoranordnung (6) als Kompressoren (8) Gasturbinen oder Schraubenverdichter aufweist oder dass die Kompressoren (8) jeweils wie folgt ausgebildet sind:

- die Kompressoren (8) weisen eine erste und eine zweite Welle auf, deren Wellenachsen mit einem seitlichen Versatz parallel zueinander angeordnet sind und die im Betrieb synchron und mit gleicher Drehzahl rotieren, so dass die beiden Wellen aneinander abrollen und gegeneinander luftdicht abgedichtet sind,
- die Kompressoren (8) weisen ein Gehäuse auf, das die erste Welle ringförmig umgibt,
- die erste Welle weist auf ihrer Außenseite eine Nase auf, die abdichtend an dem Gehäuse umläuft,
- die zweite Welle weist auf ihrer Außenseite eine Ausnehmung auf, in welche die Nase der ersten Welle beim Rotieren der Wellen temporär eintaucht und aus dem die Nase der ersten Welle sich später wieder löst,
- in dem Gehäuse sind eine Zuführöffnung und eine Auslassöffnung angeordnet, die in Drehrichtung der ersten

Welle gesehen von der Nase kurz nach dem Lösen aus der Ausnehmung bzw. kurz vor dem Eintauchen in die Ausnehmung passiert werden, so dass die Nase einen von der ersten Welle und dem umgebenden Gehäuse gebildeten jeweiligen Hohlraum in einen ersten und in einen zweiten Abschnitt unterteilt, wobei der erste Abschnitt sich von der Winkelposition, an der die Nase der ersten Welle sich von der Ausnehmung der zweiten Welle löst, bis zur momentanen Winkelposition der Nase erstreckt und der zweite Abschnitt sich von der momentanen Position der Nase bis zu der Winkelposition erstreckt, an der die Nase der ersten Welle in die Ausnehmung der zweiten Welle eintaucht,

- die Einlassöffnung ist permanent geöffnet, so dass dem ersten Abschnitt kontinuierlich Luft zugeführt wird,
- über die Auslassöffnung wird die komprimierte Luft abgegeben,
- der Auslassöffnung ist eine Schließvorrichtung zugeordnet, von der die Auslassöffnung während einer Zeitspanne, in der sich die Nase kurz vor dem Eintauchen der Nase der ersten Welle in die Ausnehmung der zweiten Welle befindet, kurzzeitig geöffnet und danach wieder geschlossen wird.

11. System nach einem der obigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass der Druckluftmotor (11) als Gasturbine oder als Schraubenmotor ausgebildet ist oder wie folgt ausgebildet ist:

- der Druckluftmotor (11) weist eine erste und eine zweite Welle auf, deren Wellenachsen mit einem seitlichen Versatz parallel zueinander angeordnet sind und die im Betrieb synchron und mit gleicher Drehzahl rotieren, so dass die beiden Wellen aneinander abrollen und gegeneinander luftdicht abgedichtet sind,
- der Druckluftmotor (11) weist ein Gehäuse auf, das die erste Welle ringförmig umgibt,
- die erste Welle weist auf ihrer Außenseite eine Nase auf, die abdichtend an dem Gehäuse umläuft,
- die zweite Welle weist auf ihrer Außenseite eine Ausnehmung auf, in welche die Nase der ersten Welle beim Rotieren der Wellen temporär eintaucht und aus dem die Nase der ersten Welle sich später wieder löst,
- in dem Gehäuse sind eine Zuführöffnung und eine Auslassöffnung angeordnet, die in Drehrichtung der ersten Welle gesehen von der Nase kurz nach dem Lösen aus der Ausnehmung bzw. kurz vor dem Eintauchen in die Ausnehmung passiert werden, so dass die Nase einen von der ersten Welle und dem umgebenden Gehäuse gebildeten ringförmigen Hohlraum in einen ersten und in einen zweiten Abschnitt unterteilt, wobei der erste Abschnitt sich von der Winkelposition, an der die Nase der ersten Welle sich von der Ausnehmung der zweiten Welle löst, bis zur momentanen Winkelposition der Nase erstreckt und der zweite Abschnitt sich von der momentanen Position der Nase bis zu der Winkelposition erstreckt, an der die Nase der ersten Welle in die Ausnehmung der zweiten Welle eintaucht,
- der Zuführöffnung ist eine Schließvorrichtung zugeordnet, von der die Zuführöffnung während einer Zeitspanne, in der sich die Nase kurz nach dem Lösen der Nase der ersten Welle aus der Ausnehmung der zweiten Welle befindet, kurzzeitig geöffnet und danach wieder geschlossen wird, so dass dem ersten Abschnitt temporär komprimierte Luft zugeführt wird,
- die Auslassöffnung ist permanent geöffnet, so dass die Luft über die Auslassöffnung kontinuierlich abgegeben wird.

12. System nach einem der obigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass das System eine elektrische Maschine (12) aufweist, dass die elektrische Maschine (12) ein Gehäuse (23) aufweist, in dem coaxial zueinander eine erste und eine zweite Welle (24, 25) gelagert sind, dass die erste und die zweite Welle (24, 25) jeweils ein Aktivteil (26, 27) der elektrischen Maschine (12) tragen, so dass zwischen den beiden Aktivteilen (26, 27) eine elektromotorische Kraft wirken kann, dass die erste Welle (24) mit dem Druckluftmotor (11) verbunden ist und dass die zweite Welle (25) mit den Kompressoren (8) der Kompressoranzordnung (6) verbunden ist.

13. System nach Anspruch 12,

dadurch gekennzeichnet,

dass das System eine weitere elektrische Maschine (28) aufweist, deren Stator drehfest angeordnet ist und deren Rotor mit dem Druckluftmotor (11) oder den Kompressoren (8) der Kompressoranzordnung (6) verbunden ist.

14. System nach einem der obigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass das System mindestens eine Zapfstelle (16) aufweist, an welcher der Kompressoranzordnung (6) Luft (7) entnommen werden kann, wobei die der Kompressoranzordnung (6) entnommene Luft (7) einen Entnahmedruck aufweist, der größer als der Anfangsdruck (p_1) und maximal so groß wie der Enddruck (p_2) ist.

FIG 1

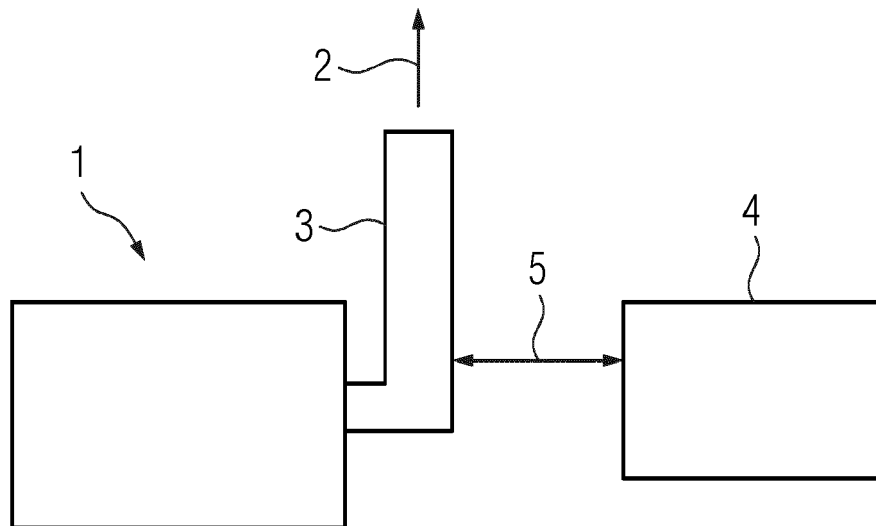


FIG 2

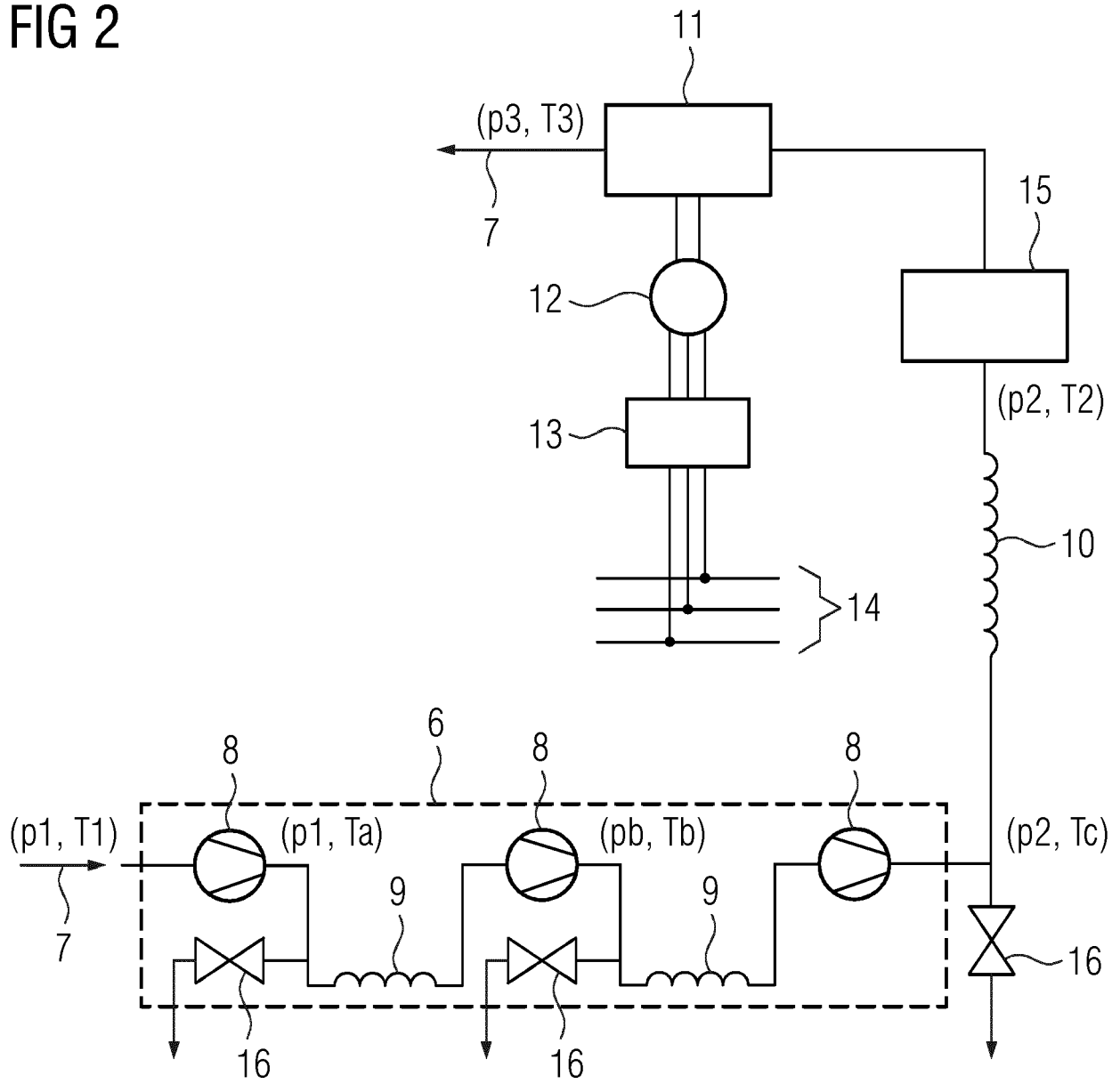


FIG 3

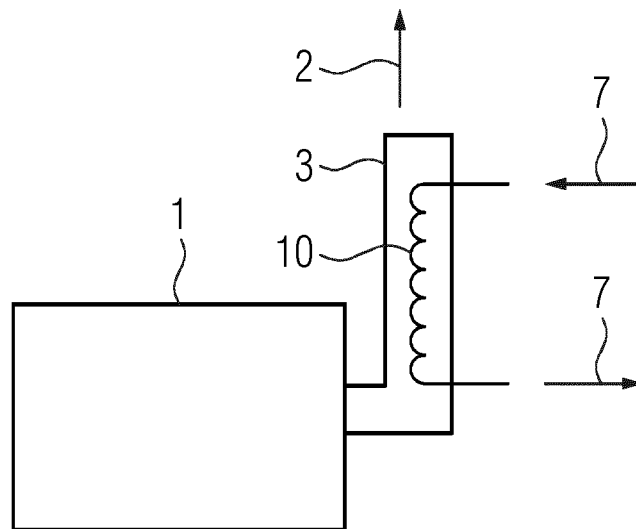


FIG 4

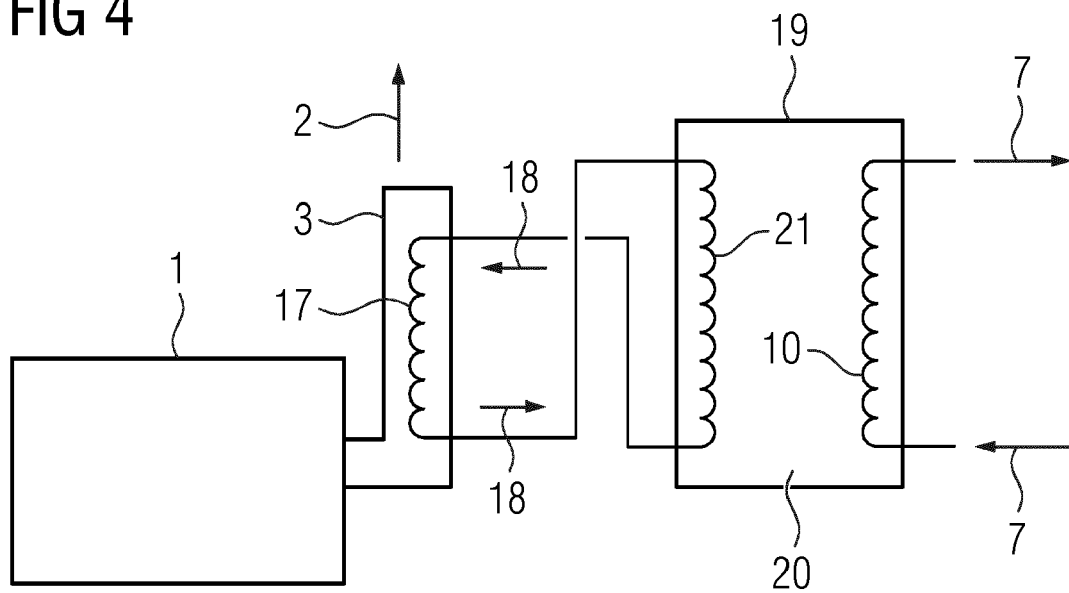


FIG 5

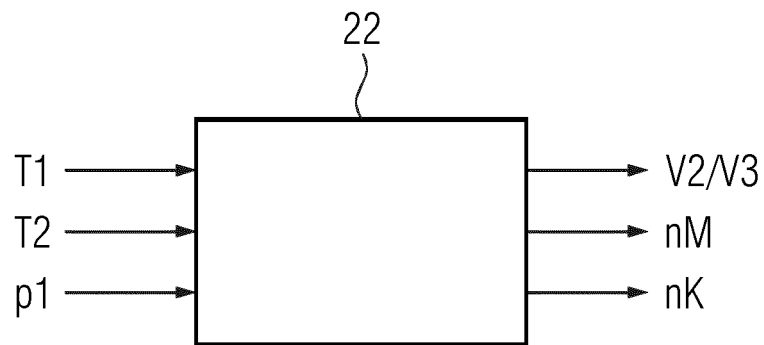


FIG 6

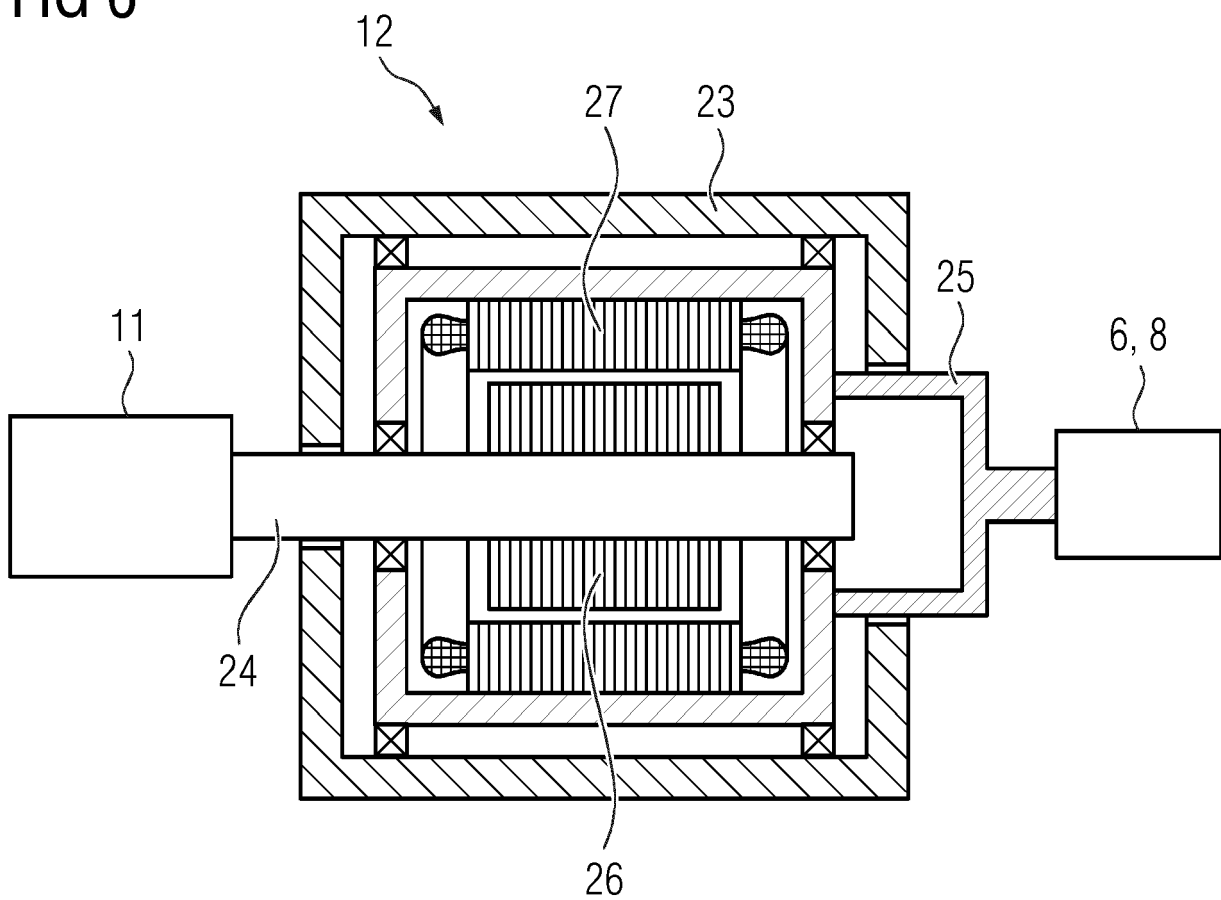


FIG 7

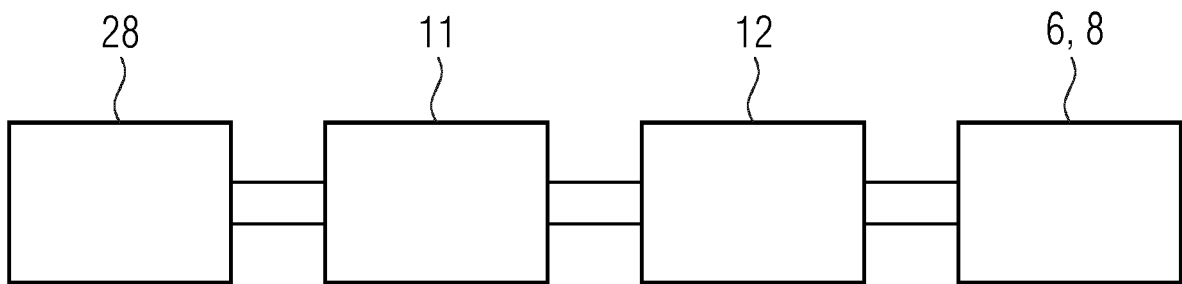
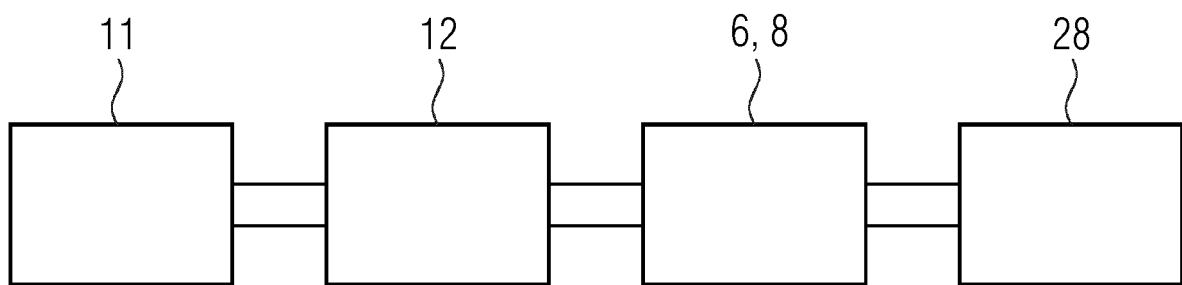


FIG 8





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 23 17 7959

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

1

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	DE 10 2009 030146 A1 (SAENERGY SYSTEMS GMBH [DE]) 30. Dezember 2010 (2010-12-30) * Zusammenfassung; Abbildung 1 * * Absätze [0012] - [0034] * -----	1-14	INV. F22B1/183
A	US 8 572 972 B2 (FREY THOMAS JOHANNES [DE]; FINKENRATH MATTHIAS [DE] ET AL.) 5. November 2013 (2013-11-05) * Zusammenfassung; Abbildung 1 * * Spalte 5, Zeilen 16-55 * -----	1-14	
A	DE 10 2013 105186 A1 (TRÄNKEL GEORG [DE]) 27. November 2014 (2014-11-27) * Zusammenfassung; Abbildungen 1, 2 * * Absätze [0032] - [0049] * -----	1-14	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			F22B
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 28. November 2023	Prüfer Varelas, Dimitrios
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

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

EP 23 17 7959

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

28-11-2023

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patentedokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
	DE 102009030146 A1	30-12-2010	KEINE	
15	US 8572972 B2	05-11-2013	EP 2499342 A2	19-09-2012
			US 2011113781 A1	19-05-2011
			WO 2011059557 A2	19-05-2011
20	DE 102013105186 A1	27-11-2014	KEINE	
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				

EPO FORM P0461

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

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

- EP 10770810 B1 [0002]
- US 20210040885 A1 [0024]
- US 10844782 B1 [0024]
- US 20220056802 A1 [0024]
- US 20230092617 A1 [0024]