

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 51097/2019  
(22) Anmeldetag: 16.12.2019  
(43) Veröffentlicht am: 15.03.2021

(51) Int. Cl.: **F02B 37/16** (2006.01)  
**F02B 37/18** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:  
EP 3078824 A1  
WO 2017105525 A1  
EP 3020939 A1  
US 2011018267 A1

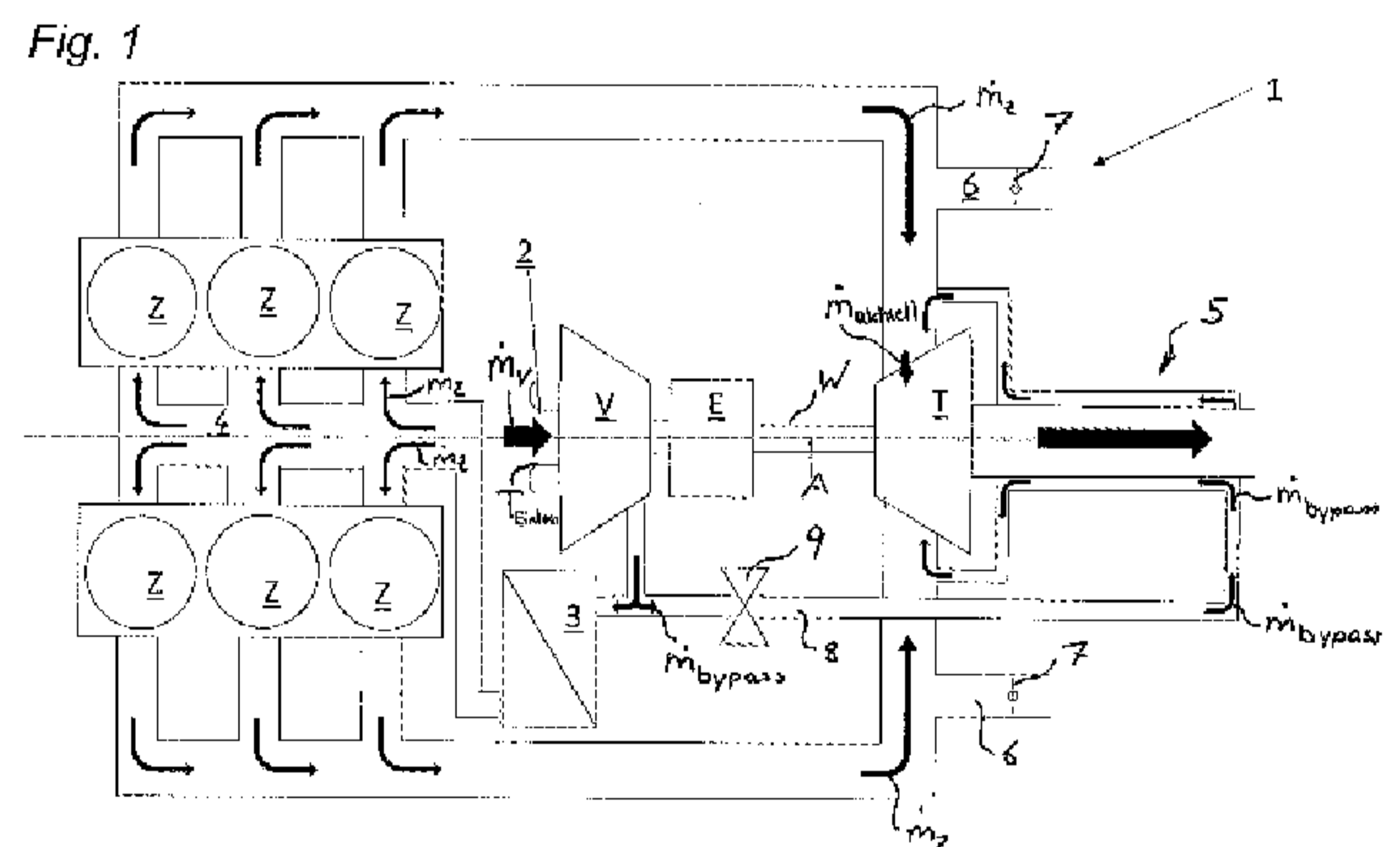
(71) Patentanmelder:  
AVL LIST GMBH  
8020 GRAZ (AT)

(72) Erfinder:  
LEICHTFRIED Christoph  
8045 Graz (AT)

(74) Vertreter:  
Babeluk Michael Dipl.Ing. Mag.  
1080 Wien (AT)

(54) **BRENNKRAFTMASCHINE**

(57) Die Erfindung betrifft Brennkraftmaschine (1) mit einem Abgasturbolader, der eine Turbine (T) und einen Verdichter (V) aufweist, die über eine Welle (W) miteinander verbunden sind, wobei der Verdichter (V) über die Welle (W) mit einer elektrischen Maschine (E) verbunden ist und der Verdichter (V) mit einem Einlassstrang der Brennkraftmaschine (1) verbunden ist, sodass der Verdichter (V) die Brennkraftmaschine (1) mit verdichtetem Gas - insbesondere Luft - versorgt, wobei in der Verbindung zum Einlassstrang eine Bypassleitung (8) vorgesehen ist, die den Verdichter (V) mit dem Auslassstrang stromaufwärts der Turbine (T) verbindet, und in der ein Wärmetauscher (5) vorgesehen ist, der in einer Abgasanlage angeordnet ist und im Gegenstromprinzip vom Abgas durchströmt wird. Aufgabe ist es, den Wirkungsgrad ( $\eta$ ) zu steigern. Das wird dadurch erreicht, dass in der Bypassleitung (8) ein Ventil (9) angeordnet ist, wobei mittels des Ventils (V) der Massenstrom ( $\dot{m}_{\text{aktuell}}$ ) durch die Turbine (T) regelbar oder steuerbar ist.



## Z U S A M M E N F A S S U N G

Die Erfindung betrifft Brennkraftmaschine (1) mit einem Abgasturbolader, der eine Turbine (T) und einen Verdichter (v) aufweist, die über eine Welle (W) miteinander verbunden sind, wobei der Verdichter (V) über die Welle (W) mit einer elektrischen Maschine (E) verbunden ist und der Verdichter (V) mit einem Einlassstrang der Brennkraftmaschine (1) verbunden ist, sodass der Verdichter (V) die Brennkraftmaschine (1) mit verdichtetem Gas - insbesondere Luft - versorgt, wobei in der Verbindung zum Einlassstrang eine Bypassleitung (8) vorgesehen ist, die den Verdichter (V) mit dem Auslassstrang stromaufwärts der Turbine (T) verbindet, und in der ein Wärmetauscher (5) vorgesehen ist, der in einer Abgasanlage angeordnet ist und im Gegenstromprinzip vom Abgas durchströmt wird. Aufgabe ist es, den Wirkungsgrad ( $\eta$ ) zu steigern. Das wird dadurch erreicht, dass in der Bypassleitung (8) ein Ventil (9) angeordnet ist, wobei mittels des Ventils (V) der Massenstrom ( $\dot{m}_{\text{aktuell}}$ ) durch die Turbine (T) regelbar oder steuerbar ist.

Fig. 1

Die Erfindung betrifft eine Brennkraftmaschine mit einem Abgasturbolader, der eine Turbine und einen Verdichter aufweist, die über eine Welle miteinander verbunden sind, wobei der Verdichter über die Welle mit einer elektrischen Maschine verbunden ist und der Verdichter mit einem Einlassstrang der Brennkraftmaschine verbunden ist, sodass der Verdichter die Brennkraftmaschine mit verdichtetem Gas - insbesondere Luft - versorgt, wobei in der Verbindung zum Einlassstrang eine Bypassleitung vorgesehen ist, die den Verdichter mit dem Auslassstrang stromaufwärts der Turbine verbindet, und in der ein Wärmetauscher vorgesehen ist, der in einer Abgasanlage angeordnet ist und - insbesondere im Gegenstromprinzip - vom Abgas durchströmt wird.

Unter Abgasturbolader versteht sich hier eine Anordnung von Turbine und Verdichter an einer gemeinsamen Welle. Zum Antrieb des Verdichters wird die Energie des Abgases in der Turbine des Abgasturboladers genutzt.

Eine derartige Brennkraftmaschine ist aus EP 3 078 824 A1 bekannt. Diese Brennkraftmaschine weist in der Abgasanlage einen Wärmetauscher auf. Durch diesen Wärmetauscher wird Wärme von der Abwärme gewonnen, die die Brennkraftmaschine sonst ungenutzt mit dem Abgas verlässt. Der Wärmetauscher wird auf der warmen Seite von Abgas und auf der kalten Seite von verdichtetem Gas aus dem Einlassstrang durchströmt. Das verdichtete Gas wird dazu direkt vom Verdichter zur Turbine über den Wärmetauscher geleitet. Wärmetausch findet dabei mit dem Abgas stromabwärts wie stromaufwärts der Turbine mit dem verdichteten Gas statt.

Nachteilig an dieser Anordnung ist, dass der Abgasturbolader nur für einen Betriebspunkt ausgelegt ist, in dem der Wirkungsgrad der Brennkraftmaschine maximal ist. Die optimalen Bedingungen zur Erreichung dieses Wirkungsgrads werden jedoch nicht durchgehend erreicht.

Die Effizienz der Brennkraftmaschine ist von großem Interesse, da dadurch Brennstoffverbrauch und Schadstoffausstoß verringert werden können.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es eine effizientere Brennkraftmaschine anzugeben.

Diese Aufgabe wird durch die obige Brennkraftmaschine und ein Fahrzeug mit einer derartigen Brennkraftmaschine erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass in der Bypassleitung ein Ventil angeordnet ist, wobei mittels des Ventils der Massenstrom durch die Turbine regelbar oder steuerbar ist.

Dadurch entsteht der Vorteil, dass der Massenstrom geregelt wird und dadurch Verdichter und Turbine im gemeinsamen optimalen Betriebspunkt arbeiten können. Beispielsweise kann bei transienten Vorgängen der Ladedruck möglichst schnell aufgebaut werden.

Ein weiterer Benefit dieser Anordnung ergibt sich schlicht dadurch, dass auch in besonders ungünstigen Betriebspunkten einem Rückstrom vom Auslassstrang entgegengewirkt werden kann. Dieser Rückstrom würde sich einstellen, wenn der Druck in der Abgasanlage den Druck im Einlassstrang übersteigt.

Diese Aufgabe wird auch durch ein dazugehöriges Verfahren zum Betrieb einer derartigen Brennkraftmaschine gelöst.

Dazu wird ein Kennfeld der Turbine hinterlegt, in dem jedem Druckverhältnis ein optimaler Massenstrom zugeordnet wird und das Ventil in der Bypassleitung wird dann geöffnet, wenn ein aktueller Massenstrom kleiner ist, als der optimale Massenstrom.

Turbinen und Verdichter können durch diese Maßnahme in einem sehr engen Bereich in ihrem jeweiligen Kennfeld betrieben werden. Dadurch wird die Frage der Auslegung erleichtert. Der Betrieb im Bestpunkt ist durch das Ventil leicht möglich, da der Betriebspunkt im Kennfeld durch den Einfluss des Massenstroms einfach entlang einer Linie des konstanten Druckverhältnisses verschoben werden kann.

Um möglichst schnell auf die Anforderungen an der Turbine reagieren zu können, ist es günstig, wenn das Ventil in der Bypassleitung stromaufwärts des Wärmetauschers angeordnet ist.

Es ist alternativ auch möglich, dass das Ventil in der Bypassleitung stromabwärts des Wärmetauschers angeordnet ist. Dies kann beispielsweise aufgrund der Anforderungen an das Packaging des Gesamtfahrzeuges notwendig sein.

Es ist günstig, wenn der Wärmetauscher stromabwärts der Turbine in der Abgasanlage angeordnet ist. Dadurch ist die Nutzung der Restwärme in der Abgasanlage optimal möglich.

Zur möglichst zeitnahen und automatischen Steuerung oder Regelung des Ventils ist in einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung eine Steuerungseinheit vorgesehen, in der ein Kennfeld der Turbine abgelegt ist und/oder abgelegt werden kann. Im dazugehörigen Verfahren ist dazu vorgesehen, dass in einem Arbeitsschritt das Kennfeld in einer Steuerungseinheit abgelegt wird.

Das Kennfeld zeigt das Druckverhältnis über dem Massenstrom an. Linien konstanten Wirkungsgrades und Drehzahlen kennzeichnen den Betrieb des Abgasturboladers.

Um die Drehzahl der Welle und somit des Abgasturboladers unabhängig vom Betriebszustand der Brennkraftmaschine steuern zu können, ist es günstig, wenn die elektrische Maschine als Motor und/oder als Generator ausgeführt ist. Dazu regelt die elektrische Maschine eine Drehzahl des Verdichters und der Turbine. Darüber hinaus kann der Generator zur Rekuperation der überschüssigen Energie genutzt werden und die elektrische Maschine rekuperiert in einem Betriebsbereich – vorzugsweise bei geschlossenem Ventil – als Generator Energie.

Um den Gesamtwirkungsgrad möglichst zu erhöhen, ist es günstig, wenn der Verdichter zumindest ein Laufrad mit backswept Laufradschaufeln aufweist. Backswept ist dabei die gängige Bezeichnung für zurückgekrümmte Laufradschaufeln bei Verdichtern.

Der Betrieb kann möglichst lange im optimalen Wirkungsgradbereich des Kennfelds gehalten werden, wenn vorgesehen ist, dass das Ventil schließt, wenn der aktuelle Massenstrom im Wesentlichen dem Betrag des optimalen Massenstroms entspricht.

Um die Steuerung zu erleichtern und einem Überschwingvorgang entgegen zu wirken, ist es vorteilhaft, wenn das Ventil geöffnet wird, bis der aktuelle Massenstrom einen Toleranzbereich um den optimalen Massenstrom erreicht und im Toleranzbereich schließt.

Es ist günstig, wenn die Steuerungseinheit feststellt, in welchem Bereich sich der aktuelle Massenstrom im Kennfeld befindet. Dazu wird der Massenstrom gemessen oder bestimmt.

In weiterer Folge wird die Erfindung anhand der nicht einschränkenden Figuren näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine erfindungsgemäße Brennkraftmaschine;

Fig. 2 ein Kennfeld eines Radialverdichters;

Fig. 3 ein Kennfeld eines Verdichters mit backswept Laufrad;

Fig. 4 ein erstes Kennfeld eines Verdichters der erfindungsgemäßen Brennkraftmaschine;

Fig. 5 ein erster Verlauf zweier Betriebsgrößen der Brennkraftmaschine;

Fig. 6 ein zweiter Verlauf zweier Betriebsgrößen der Brennkraftmaschine;

Fig. 7 ein dritter Verlauf zweier Betriebsgrößen der Brennkraftmaschine;

Fig. 8 eine schematische Darstellung eines erfindungsgemäßen Verfahrens im Kennfeld;

Fig. 9 das Kennfeld aus Fig. 8 mit zusätzlichen Erläuterungen;

Fig. 10 das Kennfeld des Verdichters einer konventionellen Brennkraftmaschine;

Fig. 11 eine schematische Darstellung des Verlaufs von einer Betriebsgröße des erfindungsgemäßen Verfahrens im Vergleich zu einem konventionellen Verfahren;  
und

Fig. 12 das Kennfeld des Verdichters der erfindungsgemäßen Brennkraftmaschine.

Fig. 1 zeigt eine erfindungsgemäße Brennkraftmaschine 1 mit einem Abgasturbolader. Dieser weist einen Verdichter V, eine elektrische Maschine E und

eine Turbine T auf. Der Verdichter V, die elektrische Maschine E und die Turbine T sind über eine gemeinsame Welle W mechanisch miteinander verbunden.

Die gezeigte Brennkraftmaschine 1 weist einen Einlassstrang auf, der von einem Einlass 2 des Verdichters V, an dem Frischluft angesaugt wird, über einen Zwischenkühler 3 und ein Einlassmanifold 4 reicht, bis hin zu Zylindern Z.

Die Luft wird im Verdichter V verdichtet und dadurch erwärmt. Im Zwischenkühler 3 wird die Luft wieder gekühlt, bevor die Luft in die Zylinder Z eingebracht. Im Zylinder Z wird Brennstoff gemeinsam mit der Luft verbrannt und durch Kolbenbewegung der nicht näher gezeigten Kolben in den Auslassstrang ausgebracht. Das erhitzte Abgas wird zur Turbine T geleitet und wird dort entspannt. Durch diese Entspannung wird kinetische Energie an die Turbine T abgegeben und mit ihr dreht sich die Welle W um die Achse A und treibt den Verdichter V mit an. Der Verdichter V ist zusätzlich durch die elektrische Maschine E antreibbar.

In bestimmten Betriebspunkten ist es möglich, überschüssige Energie durch die elektrische Maschine E durch Einsatz als Generator zurückzugewinnen. Das wird im Allgemeinen als Rekuperation bezeichnet.

Das Abgas wird nach der Turbine T in die nicht näher gezeigte Abgasanlage weitergeleitet. Dort findet eine Reinigung des Abgases von Schadstoffen durch Katalysatoren und Partikelfilter und die weitere Abkühlung statt.

Das Abgas durchströmt nach der Turbine T einen Wärmetauscher 5 zur Abgabe eines Teils der noch im Abgas vorhandenen nutzbaren Wärme.

In der gezeigten Ausführung ist vor der Turbine eine abzweigende Leitung 6 mit einer Klappe 7 angeordnet. Über diese abzweigende Leitung 6 wird Abgas an der Turbine vorbei zur Abgasanlage geleitet. Dies passiert dann, wenn der Massenstrom durch die Brennkraftmaschine nicht an der Turbine T abgearbeitet werden kann.

Auch vom Verdichter V her zum Zwischenkühler 3 ist eine Abzweigung vorgesehen, die in eine Bypassleitung 8 führt. In dieser Bypassleitung ist ein Ventil 9 angeordnet, das die Massenströme  $\dot{m}$  einstellt. Um im Teillastbetrieb ein Rückströmen des Abgases in das Einlassmanifold 4 zu verhindern, kann das Ventil 9 vorteilhaft auch als Rückschlagventil ausgeführt sein.

Die Bypassleitung 8 führt zum Wärmetauscher 5. Der Wärmetauscher 5 wird von der verdichteten Luft vom Verdichter V im Gegenstromprinzip durchströmt. Das heißt, dass das Abgas an der heißen Seite des Wärmetauschers 5 seine höchste Temperatur am ersten Ende des Wärmetauschers aufweist. Die vom Verdichter V kommende Luft weist seine tiefste Temperatur am zweiten Ende des Wärmetauschers auf. Über die Länge des Wärmetauschers wird Wärme vom Abgas an die verdichtete Luft abgegeben und so das Temperaturniveau der Gegenseite verändert. Die höchste Temperatur weist die verdichtete Luft am ersten Ende des Wärmetauschers auf und die niedrigste Temperatur weist das Abgas am zweiten Ende auf.

In alternativen Ausführungen können andere Arten von Wärmetauschern eingesetzt werden.

Vom Wärmetauscher 5 wird die verdichtete Luft stromaufwärts der Turbine T in das Abgas eingeleitet. Dadurch wird ein aktueller Massenstrom  $\dot{m}_{\text{aktuell}}$  durch die Turbine T erreicht.

In der gezeigten Ausführung ist das Ventil 9 stromaufwärts des Wärmetauschers 5 und der Turbine T angeordnet. In anderen Ausführungen ist auch eine Anordnung des Ventils 9 stromabwärts des Wärmetauschers 5 und vor der Turbine T möglich.

Durch die Bypassleitung 8 werden die Zylinder Z und der Zwischenkühler 3 bygepasst, in anderen Worten heißt das, dass die Zylinder Z und der Zwischenkühler 3 von der Strömung durch die Bypassleitung 8 umgangen werden und auf einem anderen Weg zur Turbine T führen.

In der gezeigten Ausführung weist die Brennkraftmaschine 1 sechs Zylinder Z auf. Die Zylinder Z sind dabei auf zwei Zylinderbänke zu je drei Zylindern Z an einer Zylinderbank durch die Achse A getrennt gegenüber angeordnet. Die beiden Zylinderbänke teilen sich hier das Einlassmanifold 4. Die hier gezeigte Anordnung entspricht im allgemeinen Sprachgebrauch der eines V6-Motors.

Die Abzweigung in die Bypassleitung 8 vom Verdichter V zum Wärmetauscher 5 ist vor dem Zwischenkühler 3 vorgesehen. In alternativen Ausführungen ist auch eine Abzweigung vor Eintritt in die Zylinder Z und nach Zwischenkühler 3 möglich.

Fig. 2 und Fig. 3 zeigen jeweils ein Kennfeld für einen Verdichter. Die beiden Verdichter weisen unterschiedliche Bauarten auf. Darin ist über einem Massenstrom  $\dot{m}$  ein Druckverhältnis  $\frac{p_2}{p_1}$  aufgetragen. Die Linien konstanten Wirkungsgrads  $\eta$  sind jeweils mit dem erreichten Wirkungsgrad innerhalb des geschlossenen Linienzugs beschriftet.

Die geneigte Linie zeigt die Begrenzung des Kennfelds durch die Pumpgrenze P. Über der Pumpgrenze P liegt jener Bereich, in dem die Strömung bei Betrieb des Verdichters abreißt, da der Massenstrom für ein bestimmtes Druckverhältnis  $\frac{p_2}{p_1}$  zu gering ist. Das kann bis zur Richtungsumkehr der Strömung führen, da die Druckniveaus nicht aufrecht erhalten werden können. Daher muss im Betrieb des Verdichters darauf geachtet werden, sich rechts der Pumpgrenze P im Kennfeld zu befinden.

Der Betriebsbereich oder die Breite des Kennfelds des Verdichters ist zum Teil abhängig vom Design des Laufrades des Verdichters, wie von der Art und der Anzahl der Laufradschaufeln und deren Verdrillung.

Wenn diese Laufradschaufeln so konzipiert sind, dass sie einen gewissen Anteil an einem sogenannten Backsweep besitzen, wird ein Kennfeld erreicht, das höhere Spitzenverdichtungswirkungsgraden auf Kosten der Breite des Kennfelds aufweist. Durch die verminderte Breite des Kennfelds wird es damit schwieriger an die Motoranwendungen anzupassen. Übersetzt werden könnte Backsweep beziehungsweise Backswept sinngemäß als zurückgekrümmt.

Backswept-Laufräder weisen im Unterschied zu normalen Radiallaufrädern einen über die Laufradhöhe variierenden Schaufelwinkel auf. Durch Einsatz von Backswept-Laufrädern kann der Wirkungsgrad gerade bei niedrigen Geschwindigkeiten erhöht werden.

In Fig. 2 ist ein Kompressor-Kennfeld für einen Verdichter mit einem konventionellen Radiallaufrad gezeigt. Im Vergleich dazu ist in Fig. 3 ein Kompressor-Kennfeld für einen Verdichter mit einem Backswept-Laufrad gezeigt. Dadurch erhöht sich der erreichbare Wirkungsgrad von 80% auf 85%.

Zum Nachteil ist es jedoch, dass durch diese Bauart der Laufräder die Breite des Kennfelds abnimmt. Das heißt in anderen Worten, dass der Massenstrombereich, in dem ein bestimmter Wirkungsgrad  $\eta$  bei einem bestimmten Druckverhältnis  $\frac{p_2}{p_1}$  erreicht werden kann, kleiner wird. Dies macht den Einsatz von backswept Laufrädern für Abgasturbinen praktisch unmöglich.

Der Verdichter braucht ein linear ansteigendes Druckverhältnis  $\frac{p_2}{p_1}$  um über den verschiedenen Massenströmen  $\dot{m}$  effizient arbeiten zu können. Für die Gegebenheiten einer Brennkraftmaschine benötigt der Verdichter ein breites Kennfeld.

Um ein konstant bleibendes Drehmoment abgeben zu können, muss der Verdichter ein konstantes Druckverhältnis  $\frac{p_2}{p_1}$  bereitstellen, wie bei Betrieb entlang einer ersten Linie a in Fig. 4 dargestellt ist. Zur Erreichung einer konstanten Leistung muss der Verdichter einen konstanten Massenstrom  $\dot{m}$  für verschiedene Druckverhältnisse  $\frac{p_2}{p_1}$  liefern, wie bei Betrieb entlang einer zweiten Linie b in Fig. 4.

Aus diesem Grund ist der Wirkungsgrad  $\eta$  eines Verdichters einer volllastoptimierten Brennkraftmaschine im Vergleich zu einer Gasturbine, die nur einen engen Betriebsbereich benötigt, deutlich niedriger.

Die Linie c stellt den Betrieb dar, der den maximalen Wirkungsgrad  $\eta$  erreicht.

Die Fig. 5 bis 7 zeigen über einer Drehzahl  $n$  einer beispielhaften Brennkraftmaschine einzelne Betriebsgrößen bei Volllast der Brennkraftmaschine. Fig. 5 gibt dabei das abgegebene Drehmoment  $M$  der Brennkraftmaschine über der Drehzahl  $n$ , Fig. 6 einen Ladedruck  $p$  der Brennkraftmaschine über der Drehzahl  $n$  und Fig. 7 gibt einen Brennstoffmassenstrom  $\dot{m}_B$  über der Drehzahl  $n$  an.

Durch das erfindungsgemäße Verfahren ist der Einsatz dieser wirkungsgradsteigernden konstruktiven Maßnahme jedoch problemlos möglich, wie anhand der Fig. 8 anschaulich demonstriert wird.

Kurven k stellen Linien konstanter Verdichterdrehzahl dar.

Einerseits werden durch Erwärmung der verdichteten Luft am Wärmetauscher 5 mit dem Abgas die Verluste teilweise ausgeglichen. Der größte Vorteil und Wirkungsgradgewinn geht aus den geänderten Strömungsverhältnissen am Verdichter V hervor: Bei geringeren Drehzahlen  $n$  und hohen Ladedrücken  $p$  wird ein höherer Massenstrom  $\dot{m}_{bypass}$  durch die Bypassleitung 8 zur Turbine T geleitet.

Bei hohen Drehzahlen  $n$  und niedrigen Ladedrücken  $p$  wird ein geringerer Massenstrom  $\dot{m}_{bypass}$  abgezweigt. Dadurch wird der Verdichter V in einem viel kleineren Betriebsbereich im Kennfeld als bei üblichen Brennkraftmaschinen betrieben.

Die Massenströme ergeben sich folgendermaßen:

$$\dot{m}_{bypass} = \dot{m}_{optimal} - \dot{m}_Z$$

Dabei ist  $\dot{m}_{optimal}$  der optimale Massenstrom durch den Verdichter V und  $\dot{m}_Z$  ist der Massenstrom, der dem Zwischenkühler 3 und den Zylindern Z zugeführt wird. Der optimale Massenstrom  $\dot{m}_{optimal}$  wird derart gewählt, dass der höchste erreichbare Wirkungsgrad  $\eta$  erzielt wird.

Diese Massenströme werden durch Stellung des Ventils 9 von der nicht in den Figuren dargestellten Steuerungseinheit geregelt oder gesteuert.

Durch das Bypassen der Zylinder Z wird der Betriebspunkt  $BP_V$  des Verdichters V im Zieldruckverhältnis DV im Kennfeld nach rechts verschoben. Das Zieldruckverhältnis DV ist das Druckverhältnis, das zur Aufrechterhaltung des effizienten Betriebs bei einer bestimmten Drehzahl  $n$  nötig ist. Somit ist der Betriebspunkt  $BP_V$  der Betriebspunkt mit dem höchsten Wirkungsgrad bei dieser Verdichterdrehzahl.

Die Steuerungseinheit stellt zur Regelung oder Steuerung des Verfahrens Abschätzungen an. Dabei soll ein maximaler Wirkungsgrad  $\eta$  des Verdichters V erreicht werden.

Der Massendurchfluss  $\dot{m}_{bypass}$  der Bypassleitung 8 für eine bestimmte Drehzahl  $n$  ergibt sich als Differenz zwischen dem optimalen Massenstroms  $\dot{m}_{optimal}$  und dem

Massenstrom  $\dot{m}_Z$  von verdichteter Luft durch die Zylinder Z jeweils für eine bestimmte Drehzahl  $n$ .

Zur Berechnung des richtigen Massendurchflusses  $\dot{m}_{bypass}$  der Bypassleitung muss man den optimalen Massenstrom  $\dot{m}_{optimal}$  bei dem Zieldruckverhältnis  $DV$  berechnen. Hierfür benötigt man den maximalen Wirkungsgrad des Verdichters  $\eta_{VerdichterMax.}$  im gesamten Kennfeld sowie das Druckverhältnis  $DV_{\eta_{(VerdichterMax.)}}$  und den Massenstrom  $\dot{m}_{\eta_{(VerdichterMax.)}}$  beim maximalen Wirkungsgrad. Massenstrom  $\dot{m}_{aktuell}$  für eine bestimmte Drehzahl  $n$  ergibt sich anhand folgender Formel:

$$\dot{m}_{optimal}(DV) = DV \frac{\dot{m}_{\eta_{(VerdichterMax.)}}}{DV_{\eta_{(VerdichterMax.)}}}$$

In Worten bedeutet das, dass der optimale Massenstrom  $\dot{m}_{optimal}(DV)$  bei einem bestimmten Zieldruckverhältnis  $DV$  linear mit dem Druckverhältnis zunimmt, korrigiert mit dem Verhältnis Massenstrom bei maximalem Wirkungsgrad  $\dot{m}_{\eta_{(VerdichterMax.)}}$  zu Druckverhältnis bei maximalem Wirkungsgrad  $DV_{\eta_{(VerdichterMax.)}}$ .

Der Massenstrom  $\dot{m}_Z$  durch die Zylinder Z bei der Drehzahl  $n$  ergibt sich zu folgendem Produkt:

$$\dot{m}_Z(n) = \frac{p_{vorVerdichter} * DV(n) * T_{Einlass}(n)}{287} * \eta_{vBKM}(n) * \frac{n * 2}{h * V_Z}$$

Dabei ist  $p_{vorVerdichter}$  der Druck vor dem Verdichter V,  $DV(n)$  ist das Zieldruckverhältnis bei der Drehzahl  $n$ .  $T_{Einlass}(n)$  ist die Einlasstemperatur bei der Drehzahl  $n$ .  $\eta_{vBKM}(n)$  steht für den volumetrischen Wirkungsgrad der Brennkraftmaschine 1,  $V_Z$  für das Zylindervolumen und  $h$  für den Motorhub.

Im Vergleich zwischen konventionellem und erfindungsgemäßem Verfahren in Fig. 10 bis 12 zeigen die Linien d und e den Betrieb des Verdichters V bei verschiedenen Drehzahlen  $n$ . In Fig. 11 ist durchgezogen die Linie f für ein konventionelles Verfahren dargestellt und strichliert ist die Linie g für das erfindungsgemäße Verfahren eingezeichnet. Fig. 11 zeigt den Massenstrom  $\dot{m}_V$  durch den Verdichter V über der Drehzahl  $n$ . Es ist anhand Fig. 12 ersichtlich, dass sich die Betriebspunkte des Verdichters V entlang der Geraden des höchsten Wirkungsgrads  $\eta$  bewegen.

## P A T E N T A N S P R Ü C H E

1. Brennkraftmaschine (1) mit einem Abgasturbolader, der eine Turbine (T) und einen Verdichter (v) aufweist, die über eine Welle (W) miteinander verbunden sind, wobei der Verdichter (V) über die Welle (W) mit einer elektrischen Maschine (E) verbunden ist und der Verdichter (V) mit einem Einlassstrang der Brennkraftmaschine (1) verbunden ist, sodass der Verdichter (V) die Brennkraftmaschine (1) mit verdichtetem Gas - insbesondere Luft - versorgt, wobei in der Verbindung zum Einlassstrang eine Bypassleitung (8) vorgesehen ist, die den Verdichter (V) mit dem Auslassstrang stromaufwärts der Turbine (T) verbindet, und in der ein Wärmetauscher (5) vorgesehen ist, der in einer Abgasanlage angeordnet ist und im Gegenstromprinzip vom Abgas durchströmt wird, dadurch gekennzeichnet, dass in der Bypassleitung (8) ein Ventil (9) angeordnet ist, wobei mittels des Ventils (V) der Massenstrom ( $\dot{m}_{\text{aktuell}}$ ) durch die Turbine (T) regelbar oder steuerbar ist.
2. Brennkraftmaschine (1) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Ventil (9) in der Bypassleitung (8) stromaufwärts des Wärmetauschers (5) angeordnet ist.
3. Brennkraftmaschine (1) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Ventil (9) in der Bypassleitung (8) stromabwärts des Wärmetauschers (5) angeordnet ist.
4. Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Wärmetauscher (5) stromabwärts der Turbine (T) in der Abgasanlage angeordnet ist.
5. Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass eine Steuerungseinheit vorgesehen ist, in der ein Kennfeld der Turbine (T) abgelegt ist und/oder abgelegt werden kann.
6. Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die elektrische Maschine (E) als Motor und/oder als Generator ausgeführt ist.

7. Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Verdichter (V) zumindest ein Laufrad mit backswept Laufradschaufeln aufweist.
8. Fahrzeug mit einer Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 7.
9. Verfahren zum Betrieb einer Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass ein Kennfeld der Turbine (T) hinterlegt wird, in dem jedem Druckverhältnis ( $\frac{p_2}{p_1}$ ) ein optimaler Massenstrom ( $\dot{m}_{optimal}$ ) zugeordnet wird und dass das Ventil (9) in der Bypassleitung (8) geöffnet wird, wenn ein aktueller Massenstrom ( $\dot{m}_{aktuell}$ ) kleiner ist als der optimale Massenstrom ( $\dot{m}_{optimal}$ ).
10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass das Ventil (9) schließt, wenn der aktuelle Massenstrom ( $\dot{m}_{aktuell}$ ) im Wesentlichen dem Betrag des optimalen Massenstroms ( $\dot{m}_{optimal}$ ) entspricht.
11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, dass das Ventil (9) geöffnet wird, bis der aktuelle Massenstrom ( $\dot{m}_{aktuell}$ ) einen Toleranzbereich um den optimalen Massenstrom ( $\dot{m}_{optimal}$ ) erreicht und im Toleranzbereich schließt.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass die elektrische Maschine (E) eine Drehzahl (n) des Verdichters (V) und der Turbine (T) regelt.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die elektrische Maschine (E) in einem Betriebsbereich – vorzugsweise bei geschlossenem Ventil (9) – als Generator Energie rekuperiert.
14. Verfahren nach Anspruch 9 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass das Kennfeld in einer Steuerungseinheit abgelegt wird.
15. Verfahren nach Anspruch 14, dass die Steuerungseinheit feststellt, in welchem Bereich sich der aktuelle Massenstrom ( $\dot{m}_{aktuell}$ ) im Kennfeld befindet.

2019 12 16

Fig. 1

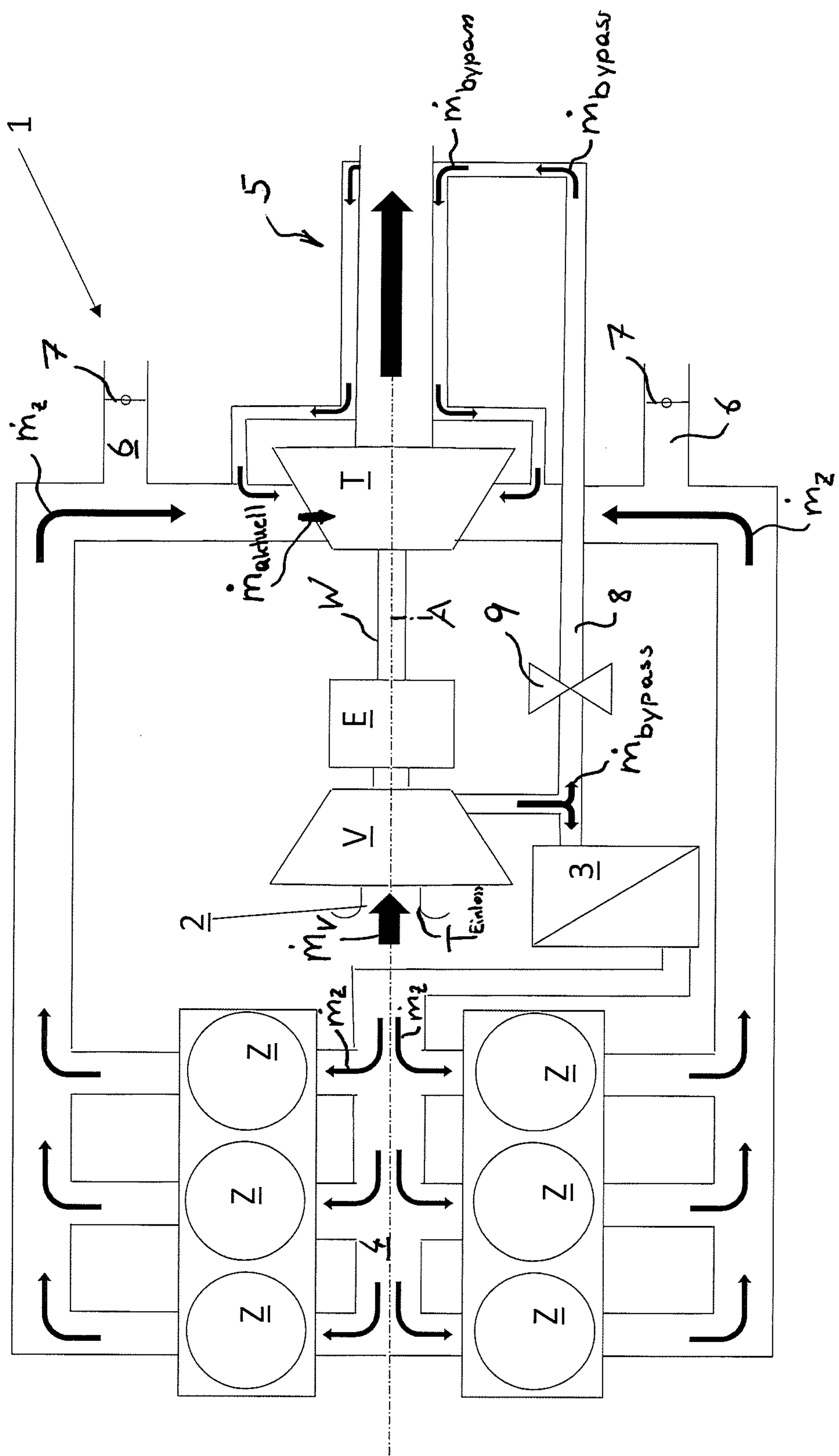


Fig. 3

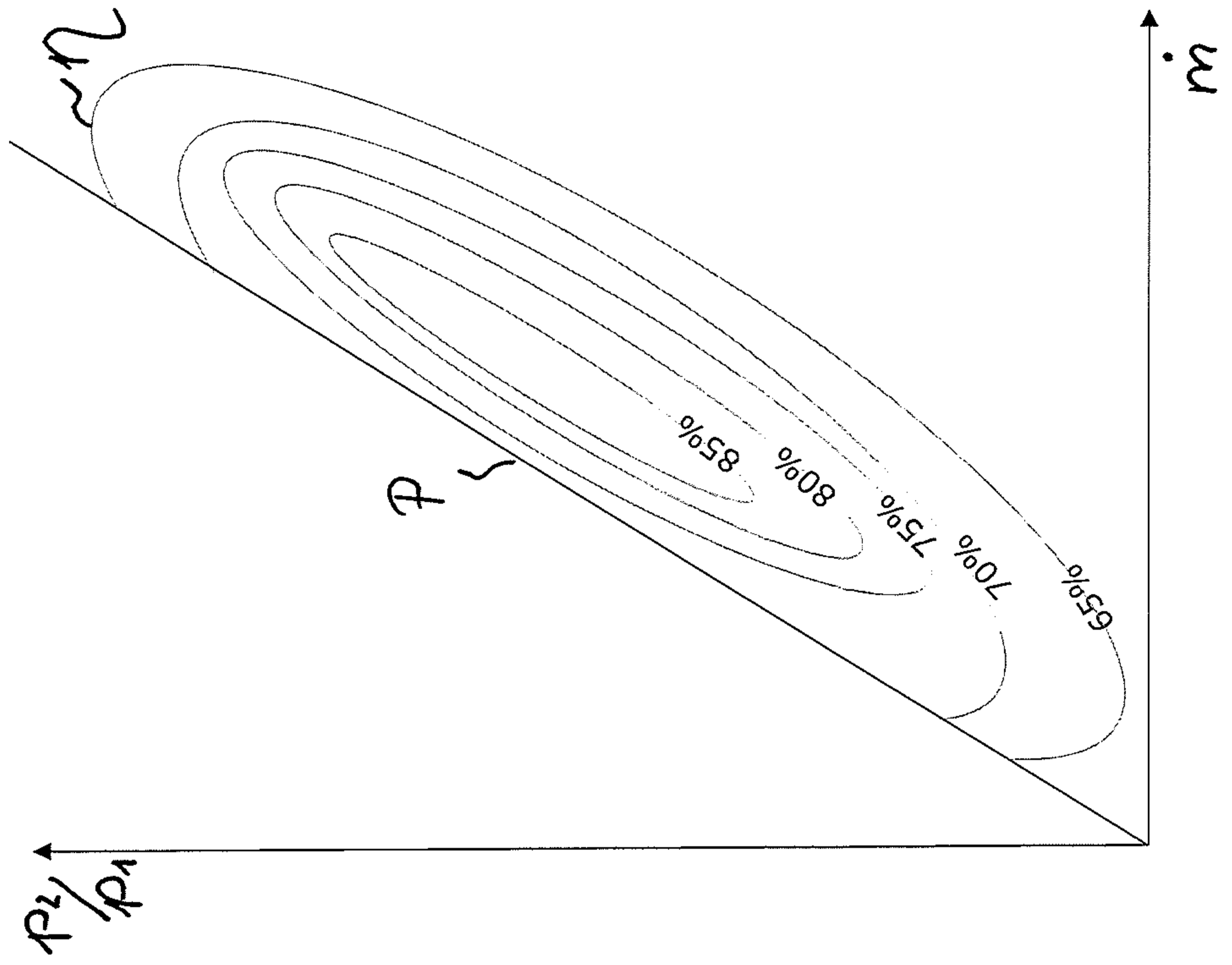


Fig. 2

