

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 1 079 179 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des
Hinweises auf die Patenterteilung:
24.11.2004 Patentblatt 2004/48

(51) Int Cl.7: **F23R 3/34**

(21) Anmeldenummer: **00117741.9**

(22) Anmeldetag: **17.08.2000**

(54) **Verfahren zur Adaption des Betriebszustandes einer gestuften Brennkammer für Gasturbinen**

Process for adapting the operating condition of a gas-turbine staged combustion chamber

Procédé pour l'adaptation de l'état de fonctionnement d'une chambre de combustion étagée de
turbines à gaz

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE FR GB

(30) Priorität: **04.07.2000 DE 10032471**
21.08.1999 DE 19939812

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
28.02.2001 Patentblatt 2001/09

(73) Patentinhaber: **Rolls-Royce Deutschland Ltd &
Co KG**
15827 Dahlewitz (DE)

(72) Erfinder:

- **Rackwitz, Leif, Dipl.-Ing.**
12437 Berlin (DE)
- **Schmidt, Klaus-Jürgen, Dr. Ing.**
81247 München (DE)

(74) Vertreter: **Weber, Joachim, Dr.**
Hoefer & Partner
Patentanwälte
Gabriel-Max-Strasse 29
81545 München (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
WO-A-95/17632 **US-A- 5 878 566**

EP 1 079 179 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Brennstoffeinspritzsystem für eine gestufte Brennkammer beispielsweise eines Fluggasturbinen-Triebwerks oder einer statischen Gasturbine, deren Pilotbrenner stets mit einer gewissen Brennstoffmenge versorgt wird/werden, während deren Hauptbrenner(n) nur bei höherer Triebwerksleistung Brennstoff zugemessen wird, wobei stromab einer die gesamte Brennstoffmenge bestimmenden Steuer-Ventileinheit eine diesen Gesamt-Brennstoffmassenstrom auf den/die Pilotbrenner sowie den/die Hauptbrenner veränderbar aufteilende Stufungs-Ventileinheit vorgesehen ist, die beide von einem Triebwerksregler angesteuert werden, der für die Ansteuerung der Stufungs-Ventileinheit die gewünschte Triebwerksleistung zugrunde legt. Ein derartiges Brennstoffeinspritzsystem ist aus der WO 95/17632 bekannt.

[0002] Mit einer so genannten gestuften Brennkammer sind an einer Gasturbine, insbesondere an einem Fluggasturbinen-Triebwerk, verringerte Schadstoffemissionen erzielbar, wenn die Brennstoffeinspritzung in die Brennkammer hierfür geeignet ausgelegt wird. Insbesondere muss hierfür die genannte Stufungs-Ventileinheit geeignet angesteuert werden, das heißt die Aufteilung der der Brennkammer in einem bestimmten Betriebspunkt zugemessenen gesamten Brennstoffmenge auf deren so genannten Pilotzone, welcher der oder zumeist die mehrfach vorhandenen Pilotbrenner zugeordnet ist/sind, sowie auf deren Hauptzone, welcher der oder zumeist die mehrfach vorhandenen Hauptbrenner zugeordnet ist/sind, sollte unter Verwendung von Kennfeldern erfolgen, die bevorzugt im Hinblick auf niedrige Schadstoffemissionen der Brennkammer beziehungsweise der in dieser stattfindenden Verbrennung hin ausgelegt sind. Selbstverständlich können bei der Auslegung dieser Kennfelder auch weitere Kriserien berücksichtigt werden, so bspw. eine möglichst große Stabilitätsreserve gegenüber einer Flammenverlöschung. In diesem Zusammenhang sei noch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass unter der genannten Aufteilung des Gesamt-Brennstoffmassenstromes auf die Pilotzone sowie auf die Hauptzone der Brennkammer auch derjenige Zustand zu verstehen ist, in dem die gesamte Brennstoffmenge alleine dem/den Pilotbrenner(n) zugeführt wird.

[0003] In der eingangs genannten WO 95/17632 wird von einem so genannten Schubindikativen Parameter gesprochen, anhand dessen die genannte Aufteilung des Gesamt-Brennstoffmassenstromes vorgenommen wird, das heißt dieser Schubindikative Parameter dient als Eingangsgröße für die Ansteuerung einer so genannten Stufungs-Ventileinheit, die die genannte Aufteilung der von einer Steuer-Ventileinheit zugemessenen gesamten Brennstoffmenge auf die Pilotbrenner sowie auf die Hauptbrenner vornimmt. Dieser dort so genannte Schubindikative Parameter, der allgemein auch als Stufungsparameter bezeichnet werden kann

und als ein solcher verwendet wird, ist dabei auch eine Kenngröße für die gewünschte Triebwerksleistung, die mit dem zugemessenen Gesamt-Brennstoffmassenstrom erzeugt werden kann. Für diesen Stufungsparameter, der selbstverständlich einfach erfassbar beziehungsweise messbar sein soll, werden in dieser genannten Schrift entweder die Gastemperatur am Kompressor-Austritt oder der Quotient aus dem Gesamt-Brennstoffmassenstrom und dem Druck in der Brennkammer vorgeschlagen.

[0004] Wie bereits erwähnt wurde, soll die Stufungs-Ventileinheit bevorzugt unter Rückgriff auf emissionsoptimierte Kennfelder angesteuert beziehungsweise betätigt werden, das heißt der so genannte Stufungsparameter, anhand dessen die Stufungs-Ventileinheit (wegen des Rückgriffs auf die genannten Kennfelder) anhand einer Schaltgeraden angesteuert wird, sollte nicht nur einen Bezug zur Triebwerksleistung haben, sondern in direkter Weise auch mit dem Betrieb der Brennkammer in Zusammenhang stehen, um die Vorteile, die eine gestufte Brennkammer hinsichtlich verringerter Schadstoffemissionen grundsätzlich besitzt, auch tatsächlich nutzen zu können.

[0005] Bei der Regelung eines Gasturbinenflugtriebwerks mit einer schadstoffarmen, gestuften Brennkammer ist ein ständiges Hin- und Herstufen zwischen Pilot- und Zweistufenbetrieb bei kleinen Drehzahl- oder Lastoszillationen zu vermeiden. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf die Triebwerksstabilität sondern beeinflusst die Lebensdauer der Heißeile negativ. Eine so genannte Schalthysterese verhindert durch ein entsprechend breit definiertes Hystereseband unerwünschtes zyklisches Schalten der Kraftstoffstufung.

[0006] Allgemein werden solche Hysterese-Verfahren in der Regelung häufig eingesetzt. Durch die Definition eines oberen und eines unteren Stufungspunktes wird zum Beispiel ein Zurückstufen in den Pilotbetrieb erst vorgenommen, wenn der untere Stufungspunkt unterschritten wurde und damit auch eine entsprechend größere Laständerung des Triebwerks stattgefunden hat. Ein solches Verfahren ist in der WO 95/17632 beschrieben.

[0007] Die Nutzung einer Schalthysterese bringt folgende Nachteile mit sich: Die ständige Berechnung zweier Stufungspunkte (unterer und oberer) erfordert einen höheren Software-Aufwand als die Verwendung eines einzelnen Stufungspunktes. Weiterhin erfordert die Verwendung eines Hysteresebandes im Stufungsschaltplan einen weiter gehenden Kompromiss hinsichtlich der Optimierung zur Schadstoffarmut im Stufungsbereich als die Verwendung eines einzelnen Stufungspunktes. Auch die Qualität des Stufungsparameters wird in der Praxis durch Signalrauschen zu Zugeständnissen in der Breite des Hysteresebandes führen. Darunter leidet auch die Schadstoffoptimierung beziehungsweise es muss teure Messtechnik zum Einsatz kommen. Beim Einsatz einer Schalthysterese ist deren Bandbreite flexibel und abhängig vom transienten Zu-

stand des Triebwerks zu halten. Auch dies stellt hohe Ansprüche an das Messsignal.

[0008] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, an einem Brennstoffeinspritzsystem nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 Maßnahmen aufzuzeigen, mit Hilfe derer der Betrieb der Brennkammer des Fluggas-turbinen-Triebwerks insbesondere hinsichtlich niedriger Schadstoffemissionen weiter verbessert werden kann.

[0009] Erfindungsgemäß wird die Aufgabe durch die Merkmale des Hauptanspruchs gelöst, die Unteransprüche zeigen weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung.

[0010] Die Erfindung zeichnet sich durch eine Reihe erheblicher Vorteile aus.

[0011] Erfindungsgemäß wurde ein Regelkonzept zum sicheren und verlustminimierenden Betrieb einer gestuften Brennkammer für Flugtriebwerke gefunden. Die gestufte Brennkammer kann mit Hilfe des erfindungsgemäßen Regelsystems in zwei verschiedenen Betriebszuständen betrieben werden. Im unteren Lastbereich wird der gesamte Kraftstoff in die Pilotzone der Brennkammer eingespritzt. In diesem Modus entspricht die Operationsweise der gestuften Brennkammer der einer ungestuften Brennkammer. Zusätzlich werden im ungestuften Betrieb die Hauptbrenner mit Kraftstoff aus dem Pilotzweig gekühlt, um die Verkokungsgefahr zu verringern. Ab einem bestimmten Betriebspunkt erfolgt die definierte Zuschaltung der Hauptstufe, sodass beide Ringleitungen (Pilotstufe und Hauptstufe) mit Kraftstoff versorgt werden. Die Aufteilung des Kraftstoffs erfolgt über ein zusätzliches Zumesventil, das den Gesamtkraftstoff auf den Pilot- und den Hauptzweig verteilt. Dieser Betriebszustand der Brennkammer wird als gestufter Modus bezeichnet.

[0012] Ein wesentliches Element des neuen Verfahrens ist das Zeitelement "TIMER". Die vorgeschaltete Logik zur Berechnung eines nominalen Stufungspunktes ermöglicht somit, dass über eine Summationsstelle verschiedene Einflüsse wie zum Beispiel instationärer Betrieb und Flughöhe berücksichtigt werden können. Ist die Differenz zwischen dem neuen angepassten Schaltungspunkt und dem aktuellen Messwert kleiner als ein Grenzwert, wird der gestufte Modus selektiert (Kommando für Stufungspunkt, $SPK = 1$). Nach dem Überbeziehungsweise Unterschreiten des nominalen Stufungspunktes wird der Umschaltvorgang zeitlich verzögert, wenn die Zeitdauer seit dem Ausführen der letzten Stufung kleiner ist als eine vordefinierte Zeitkonstante, die in einem Kennfeld abgelegt ist.

[0013] Sobald SPK den Wert 1 annimmt, wird das Zeitelement "TIMER" aktiviert. Die Funktion "TIMER" besitzt als Eingangsgröße den aktuellen, momentanen Wert von SPK . Der Parameter $t_{MIN, Stufung}$ dient zur Steuerung des Elementes "TIMER" und beschreibt die Zeitdauer, die mindestens zwischen zwei Stufungsergebnissen eingehalten werden muss, wenn zwischen den beiden Betriebszuständen umgeschaltet werden

soll. Liegt das Kommando für eine weitere Stufung innerhalb des Zeitfensters, wird die Ausgangsgröße des Zeitelementes (zeitverzögertes Kommando für Stufungspunkt, SPK^*) solange auf den Wert der Eingangsgröße (= SPK) gehalten, bis die aktuelle Zeitspanne seit der letzten Stufung größer ist als das minimale Stufungsintervall, das heißt $t_{TIMER} > t_{MIN, Stufung}$.

[0014] Das Kennfeld für den minimalen Stufungszyklus $t_{MIN, Stufung}$ berücksichtigt den Einfluss schneller Lastwechsel des Flugtriebwerkes. Bei schnellen Lastwechseln, bei denen eine unverzügliche Systemantwort des Triebwerkes zum Beispiel beim Durchstarten gefordert wird, ist die Forderung nach der Einhaltung eines minimalen Stufungszyklus von untergeordneter Bedeutung, sodass der Wert von $t_{MIN, Stufung}$ gleich 0 ist. Je langsamer der Lastwechsel ist, desto größer wird $t_{MIN, Stufung}$ und erreicht im Fall quasi-stationärer Lastwechsel den Maximalwert, der unendlich groß ist ($t_{MIN, Stufung} \gg 1 \text{ sec}$). In diesem Fall, wenn kein Lastwechsel erfolgt beziehungsweise die Schubhebelposition unverändert bleibt, ist der Betriebszustand der Brennkammer "eingefroren" das heißt- ändert sich nicht und die Brennkammer verharrt in ihrem vorherigen Betriebsmodus (entweder ungestuft oder gestuft). Erst wenn ein Lastwechsel durch eine Drehzahländerung ($IdNH/dt > 0$) auftritt, kann sich der Betriebszustand der Brennkammer ändern und es wird wieder ein endlicher minimaler Stufungszyklus ($t_{MIN, Stufung} < 1 \text{ sec}$) selektiert.

[0015] Die Ausgangsgröße SPK^* der Funktion "TIMER" dient als Steuergröße für ein nachfolgendes Auswahlelement. Besitzt SPK^* den Wert 0, wird am Auswahlelement "F" (= falsch) selektiert. In diesem Zustand ist der berechnete Betriebszustand (BZ) der gestuften Brennkammer gleich SPK , das heißt zur Auswahl des Betriebsmodus wird der aktuelle Wert der Stufungspunktberechnung herangezogen. Sobald $SPK^* = 1$ ist, das heißt eine Stufung innerhalb von $t_{MIN, Stufung}$ erfolgen soll, wird im Gegensatz dazu (Auswahlelement "T" (= true, richtig)) der historische Wert von BZ, das heißt der Wert aus dem letzten Zeitschritt Z^{-1} , verwendet. Damit wird sichergestellt, dass zwischen beiden Betriebsmodi kein zyklisches Schalten des Stufungsventils auftritt. Bei Überschreiten des Zeitkriteriums für den minimalen Stufungszyklus wird der Betriebszustand (0 = ungestuft, 1 = gestuft) wieder nach der erfindungsgemäßen Berechnungsvorschrift kontrolliert.

[0016] Die vorliegende Erfindung ermöglicht somit ein hohes Maß an Flexibilität bei der Regelung des Betriebszustandes einer gestuften Brennkammer, da durch die Einführung einer variablen Zeitfunktion ein stabiler Betrieb der Brennkammer im ungestuften und gestuften Betrieb sichergestellt ist. Ein erhöhtes Signalrauschen der Regelparameter zum Beispiel von P30 wirkt sich nicht auf die Auswahl des Betriebszustandes im stationären Betrieb des Flugtriebwerkes aus, da in diesem Fall ein Umschalten nicht möglich ist. Erst bei einem Lastwechsel, der in Form einer Änderung der

Hochdruckdrehzahl detektiert wird ($IdNH/dt > 0$), ist ein weiterer Schaltvorgang freigegeben

[0017] . Erfindungsgemäß ist weiterhin vorgesehen, dass die Triebwerksleistung durch die Belastung der Gasturbinen-Brennkammer in Form eines so genannten Stufungsparameters (SP) charakterisiert ist, anhand dessen die Stufungs-Ventileinheit entsprechend einer Schaltgeraden angesteuert wird und wobei der Stufungsparameter (SP) aus einem der folgenden funktionalen Zusammenhänge abgeleitet wird:

[0018] Nach dem ersten funktionalen Zusammenhang wird der Gesamt-Brennstoffmassenstrom (WF) durch den Gasdruck am Brennkammer-Eintritt (P30) dividiert und dieser Quotient mit der Gastemperatur am Brennkammer-Eintritt (T30) multipliziert, das heißt der Stufungsparameter SP ist eine Funktion von $[WF / P30 \cdot T30]$.

[0019] Nach dem zweiten funktionalen Zusammenhang wird der Gesamt-Brennstoffmassenstrom (WF) durch den Gasdruck am Brennkammer-Eintritt (P30) dividiert und dieser Quotient mit der Quadratwurzel der Gastemperatur am Brennkammer-Eintritt (T30) multipliziert, das heißt der Stufungsparameter SP ist eine Funktion von $[WF / P30 \cdot (T30)^{1/2}]$.

[0020] Nach dem dritten funktionalen Zusammenhang wird der Gesamt-Brennstoffmassenstrom (WF) durch den Gasdruck am Brennkammer-Eintritt (P30) dividiert und dieser Quotient mit der Quadratwurzel des Quotienten aus der Gastemperatur am Brennkammer-Eintritt (T30) und der Gastemperatur am Triebwerks-Eintritt (T20) multipliziert, das heißt der Stufungsparameter SP ist eine Funktion von $[WF / P30 \cdot (T30 / T20)^{1/2}]$.

[0021] Nach dem vierten funktionalen Zusammenhang wird der Gesamt-Brennstoffmassenstrom (WF) durch den Gasdruck am Brennkammer-Eintritt (P30) dividiert und dieser Quotient mit dem Wert der Größe der Total-Temperatur stromab der Hochdruckturbine (= T44) oder mit der Quadratwurzel hiervon multipliziert, das heißt der Stufungsparameter SP ist eine Funktion von $[WF / P30 \cdot T44]$ beziehungsweise SP ist eine Funktion von $[WF / P30 \cdot (T44)^{1/2}]$.

[0022] In anderen Worten ausgedrückt soll die Regelung des Brennstoffeinspritzsystems einer gestuften Gasturbinen-Brennkammer also durch einen die Belastung dieser Brennkammer charakterisierenden Stufungsparameter erfolgen, wobei die besagte Stufungsventileinheit entsprechend einer Schaltgeraden angesteuert wird und der Stufungsparameter aus einem der oben aufgelisteten Zusammenhänge abgeleitet wird.

[0023] Erfindungsgemäß handelt es sich nun beim Stufungsparameter (SP) weniger um einen schubindikativen Parameter sondern vielmehr um einen die Brennkammerbelastung widerspiegelnden Parameter, sodass die Kennfelder, auf welche über diesen Stufungsparameter zugegriffen wird und aus denen heraus die Stufungs-Ventileinheit entsprechend einer Schaltgeraden angesteuert wird, unter deutlich stärkerer Bezugnahme auf die Brennkammer und somit auf die darin

stattfindende Verbrennung ausgelegt werden können. Damit ist eine verbesserte Verbrennung in nahezu allen Brennkammer-Betriebszuständen, in denen eine gestufte Verbrennung erfolgt, das heißt in denen sowohl die Pilotbrenner als auch die Hauptbrenner mit Brennstoff versorgt werden, erzielbar.

[0024] In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass der Gesamt-Brennstoffmassenstrom (WF) über eine spezielle Kalibriertabelle in Abhängigkeit von der Ventilposition der eingangs bereits genannten Steuer-Ventileinheit, die diesen in Form eines primären Zumessventiles bestimmt, berechnet werden kann. Dabei kann das diesen Gesamt-Brennstoffmassenstrom wiedergebende Signal, das gegenüber Signalrauschen besonders anfällig sein kann, mit Hilfe geeigneter Tiefpasselemente gefiltert werden. Ferner können die Anforderungen an das jeweils gewünschte Brennstoff-Luft-Verhältnis in den einzelnen Betriebspunkten (insbesondere auch hinsichtlich der jeweiligen Flamm-Verlöschgrenzen) über funktionale Zusammenhänge in entsprechenden Kennfeldern abgebildet werden.

[0025] Wie bereits erläutert wurde, kann eine gestufte Brennkammer mit Hilfe eines erfindungsgemäßen Regelsystems in zwei verschiedenen Operationsmodi betrieben werden. Im unteren Lastbereich des Triebwerks wird der gesamte Brennstoff in die Pilotzone der Brennkammer eingesprüht, sodass in diesem Modus die Operationsweise der gestuften Brennkammer derjenigen einer ungestuften Brennkammer entspricht. Ab einem bestimmten Betriebspunkt erfolgt die definierte Zuschaltung der Hauptstufe, wonach sowohl die Pilotbrenner als auch Hauptbrenner mit Brennstoff versorgt werden. Das Umschalten zwischen dem ungestuften und dem gestuften Betriebsmodus erfolgt unter Einbeziehung des erfindungsgemäßen Zeitelements (TIMER), wobei bei einem Ansteigen der Triebwerksleistung über den Stufungspunkt die Hauptbrenner zugeschaltet und bei Absinken der Triebwerksleistung unter den Stufungspunkt die Hauptbrenner abgeschaltet werden.

[0026] In einem quasistationären Betriebszustand des Triebwerks wird der Stufungspunkt bevorzugt aus einem Kennfeld in Abhängigkeit vom erfindungsgemäßen Stufungsparameter ermittelt. Damit jedoch erwünschtermaßen stets beim gleichen Wert für das Brennstoff-Luftverhältnis umgeschaltet wird, sollen nach einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung verschiedene Einflüsse berücksichtigt werden. Der Stufungspunkt ergibt sich durch Addition beziehungsweise Subtraktion von Korrekturgliedern (ΔSP) zu beziehungsweise von dem nominalen, aus einem der weiter oben genannten funktionalen Zusammenhänge abgeleiteten Stufungsparameter (SP). Dabei sei darauf hingewiesen, dass für jeden Einflussparameter ein eigenes additives Korrekturglied vorgesehen sein kann, die dann alle aufsummiert werden können, sodass praktisch alle wesentlichen Einflussparameter bei der Berechnung des Stufungspunktes über eine einfache

Summenbildung berücksichtigt werden können. Der einzelne Beitrag der Einflussparameter wird dabei als relative Änderung zum nominalen Stufungspunkt erfasst.

[0027] Ein erster derartiger Einflussparameter ist der Absolutwert des Gasdruckes (P30) und/oder die Gastemperatur (T30) am Brennkammer-Eintritt. Diesbezüglich wird vorgeschlagen, den Stufungsvorgang vom ungestuften in den gestuften Betrieb zu verzögern, sobald der Brennkammer-Eintrittsdruck (P30) und/oder die Brennkammer-Eintrittstemperatur (T30) unterhalb bestimmter durch Brennkammerversuche ermittelte Grenzwerte für den stabilen Betrieb der Brennkammer sinkt/sinken. Diese Funktion ist insbesondere im gestuften Modus aktiv und führt bei Unterschreitung der genannten Grenzwerte für (P30) und/oder (T30) zum Umschalten in den Pilotbetrieb, in welchem nur die Pilotbrenner mit Brennstoff versorgt werden.

[0028] Ein zweiter Einflussparameter ist die korrigierte Drehzahl des Hochdruckverdichters (N2RT20) und der Gasdruck am Triebwerkseintritt (P20). Mit Hilfe dieser weiteren redundanten Funktion kann ein Umschalten vom ungestuften in den gestuften Modus unterhalb des Leerlaufbetriebszustandes des Triebwerkes verhindert werden. Konkret wird hierfür vorgeschlagen, in Abhängigkeit von definierten Grenzwerten für die korrigierte Drehzahl des Hochdruckverdichters (N2RT20) und für den Fan-Eintrittsdruck (P20) den Stufungspunkt künstlich zu sehr hohen Werten für den Stufungsparameter (SP) zu verschieben und damit solange ein Umschalten zu verhindern, bis diese Grenzwerte überschritten sind.

[0029] Ein dritter Einflussparameter ist die Flughöhe des Fluggasturbinen-Triebwerks sowie Änderungen von Umgebungsbedingungen.

[0030] Ein vierter Einflussparameter schließlich ist die Lastwechselgeschwindigkeit des Triebwerkes, und zwar mit folgendem Hintergrund: Im gestuften Modus ist die Stabilität der Verbrennung in der Pilotzone zur Gewährleistung eines sicheren Betriebes der Brennkammer von entscheidender Bedeutung. Damit in jedem Betriebszustand keine Flammenverlöschung der Pilotbrenner durch eine ungünstige Brennstoffaufteilung auf die beiden Brennstoffkreise, das heißt auf die Pilotbrenner und auf die Hauptbrenner auftreten kann, wird der Umschaltvorgang vom reinen Pilotbetrieb in den gestuften Betrieb bei schnellen instationären Lastwechselvorgängen verzögert. Dazu wird auf den bereits genannten Grundwert des Stufungspunktes ein vom Betriebszustand der Brennkammer abhängiger Offset addiert. Hierdurch wird der Stufungspunkt bei schnellen Lastwechseln zu höheren Werten des erfindungsgemäßen Stufungsparameters (SP) hin verschoben.

[0031] Ein fünfter Einflussparameter berücksichtigt den Einfluss des Verdichterpumpens auf die Stabilität der Verbrennung in der gestuften Brennkammer.

[0032] In diesem Zusammenhang sei noch beschrieben, auf welche Weise ein schneller, sicherer und

schubverlustfreier Übergang zwischen den beiden Operationsmodi der gestuften Brennkammer gewährleistet werden kann. Ein Stufungsvorgang das heißt ein Wechsel des Operationsmodus sollte nämlich keine signifikanten Auswirkungen auf das Verhalten des gesamten Triebwerkes, wie z.B. Verdichterpumpen durch instabile Verbrennung oder vierringerten Pumpgrenzenabstand, Schubverlust, Flammenverlöschung, Beschädigung der Turbine durch Überhitzung, etc. hervorrufen. Folgende Methoden werden für einen schnellen und sicheren Übergang zwischen den Operationsmodi vorgeschlagen:

[0033] Während schneller Lastwechsel wird die Stabilität und Zündfähigkeit der Verbrennung durch eine kurzzeitige Anreicherung (Verfettung) des Brennstoff-Luft-Gemisches der Pilotzone sichergestellt, indem die Hauptstufe abgemagert und der damit überschüssige Brennstoff den Pilotbrennern zugeführt wird. Die Pilotzone arbeitet dann in jedem Fall innerhalb ihres Stabilitätsbereiches und dient für das Brennstoff-Luft-Gemisch der Hauptstufe als Zündquelle. Um dies zu erreichen, wird in Abhängigkeit von der momentanen Beschleunigung beziehungsweise Verzögerung eine erweiterte Brennstoffsplitting-Tabelle, in der in Abhängigkeit vom Stufungsparameter (SP) die Aufteilung des Gesamt-Brennstoffmassenstromes auf die Pilotbrenner sowie die Hauptbrenner fest gehalten ist, verwendet. Als indikative Parameter für diese Brennstoffsplitting-Tabelle beziehungsweise für dieses Kennfeld werden sowohl die zeitliche Ableitung der Drehzahl des Hochdruckverdichters (N2) als auch die zeitliche Ableitung des Brennkammer-Eintrittsdruckes (P30) genutzt. Zusätzlich wird über definierte Schliessratenbegrenzer eine zu starke Änderung des Brennstoffmassenstromes für den Pilotbrenner und damit eine zu starke Änderung der Brennstoff-Luft-Verhältnisse in der Pilotzone verhindert.

[0034] Parallel beziehungsweise unterstützend hierzu kann ein so genannter Splitwert, der die Kraftstoffaufteilung auf die Pilotbrenner und Hauptbrenner beschreibt (und somit aus der genannten Brennstoffsplitting-Tabelle auffindbar ist) und anhand dessen die Stufungs-Ventileinheit angesteuert wird, ebenfalls in instationären Zustände angepasst werden. Wie bereits mehrfach erwähnt wurde, wird in quasistationären Betriebszuständen des Triebwerks ein schadstoffoptimiertes Kennfeld zur Ansteuerung der Stufungs-Ventileinheit verwendet, wobei der beziehungsweise einer der erfindungsgemäßen Stufungsparameter als indikative Eingangsgröße für dieses Kennfeld herangezogen wird. Ergänzend wird nun vorgeschlagen, während instationärer Triebwerks-Manöver den berechneten Splitwert durch einen Korrekturfaktor anzupassen, wobei dieser Korrekturfaktor in Abhängigkeit von der zeitlichen Änderung der Drehzahl insbesondere der Hochdruckwelle des Triebwerks berechnet wird. Diese Anpassung kann dabei derart erfolgen, dass der kommandierte Pilot-Brennstoffmassenstrom und damit das Brennstoff-Luft-

Verhältnis der Pilotzone kurzzeitig erhöht wird, um eine Flammenverlöschung der Flammen in der Pilotzone der Brennkammer zu verhindern. Dabei empfiehlt es sich, den so berechneten Splitwert bspw. über für elektronische Steuerkreise bekannte High-Win- und Low-Win-Glieder innerhalb definierter Grenzwerte zu halten.

[0035] Um in einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung des erfindungsgemäßen Brennstoffeinspritzsystems bei Erkennen eines Pumpens des Verdichters des Fluggasturbinen-Triebwerks einen stabilen Betrieb der gestuften Brennkammer zu gewährleisten, ist Folgendes vorgesehen: Die bereits bekannten beziehungsweise existierenden Triebwerks-Regelgesetze können ein auftretendes Verdichterpumpen bevorzugt durch das Erfassen stark schwankender Werte des Gasdruckes (P30) am Brennkammer-Eintritt und durch einen anschließenden Vergleich mit einem gesetzten Grenzwert detektieren. Nun wird vorgeschlagen, dass die Ausgangsgröße dieser Logik in einer digitalen elektronischen Steuereinheit zur Umsetzung des erfindungsgemäßen Brennstoffeinspritzsystems ein Flag für den Zeitraum des detektierten Pumpvorgangs auf den Wert "1" setzt. Dieser Flag wird dann genutzt, um in den ebenfalls in der elektronischen Steuereinheit implementierten Regelgesetzen für die gestufte Verbrennung für den Zeitraum des Verdichterpumpens die Schaltgerade zu verändern, (wozu bereits an dieser Stelle auf die später noch näher erläuterte Figur 5 verwiesen wird). Dazu wird der Stufungspunkt in den Bereich hoher Lastpunkte verschoben, sodass die gestufte Brennkammer in dem Betriebsmodus vor dem Auftreten des Verdichterpumpens verweilt. Damit wird bei einer starken Änderung des Stufungsparameters ein zyklisches Schalten zwischen den beiden Operationsmodi der Brennkammer (das heißt zwischen Pilotbetrieb, in dem nur die Pilotbrenner mit Brennstoff versorgt werden, und dem gestuften Betrieb, in dem auch die Hauptbrenner Brennstoff erhalten) verhindert. Nach dem Pumpen - das heißt sobald das Flag wieder den Wert "0" annimmt - wird der Wert für den Stufungspunkt wieder entsprechend den hier beschriebenen (regulären) Regelgesetzen für den gestuften Brennkammerbetrieb berechnet. Der Vorteil dieser Methode liegt neben dem Vereindern zyklischen Schaltens auch darin, dass der aktuelle Kraftstoffsplit während des kurzzeitigen Pumpens des Verdichters ohne ein Wechsel des Betriebsmodus immer noch aus einem Kennfeld berechnet wird. Dadurch wird sichergestellt, dass der Pilotkraftstoffmassenanteil entsprechend dem Kraftstoff-Luft-Verhältnis bestimmt wird und eine genügend hohe Stabilitätsreserve gegenüber Flammenverlöschung erhalten bleibt.

[0036] In bevorzugter Weiterbildung der Erfindung wird auf einen Grenz-Ersatzwert für den Splitwert zurückgegriffen, wenn der berechnete und danach zeitlich differenzierte Splitwert einen Grenz-Differenzenwert überschreitet. Hierdurch können eventuell auftretende Störungen in der Regelgröße bspw. während schnellster Lastwechsel oder unerwarteter Betriebsstörungen

durch eine Limitierung der Öffnungs- beziehungsweise Schliessungsrate der Stufungs-Ventileinheit abgefangen werden. Diesbezüglich wird bereits an dieser Stelle auf die beigelegte, später noch kurz erläuterte Figur 4 verwiesen. Dazu wird die zeitliche Ableitung des berechneten Splitwertes über einen Zeitschritt gebildet und mit Hilfe eines Limiters begrenzt. Dieser Limiter ist nur aktiv, wenn der kommandierte beziehungsweise ermittelte Splitwert unterhalb eines definierten Grenzwertes fällt, der im gestuften Modus die maximal zulässige Brennstoff-Aufteilung auf die Pilotbrenner sowie auf die Hauptbrenner berücksichtigt. Die aktuelle Änderungsrate der Position der Stufungs-Ventileinheit wird mit der maximal erlaubten Änderungsrate beaufschlagt, solange der vordefinierte Grenzwert erreicht ist.

[0037] Weiterhin wird vorgeschlagen, während eines Stufungsvorganges beziehungsweise eines Überganges vom Pilotbetrieb (das heißt nur die Pilotbrenner werden mit Brennstoff versorgt) in den gestuften Betrieb (das heißt die Pilotbrenner und die Hauptbrenner werden mit Brennstoff versorgt) eine Änderung hinsichtlich der Entnahme von Zapfluft aus dem Triebwerk zu unterdrücken. Hierdurch kann eine zusätzliche Variation des Brennstoff-Luft-Gemisches vermieden werden. Nachdem anschließend im gestuften Operationsmodus ein Maximalwert für den Splitwert unterschritten wird, erfolgt dann minimal verzögert die gewünschte Zapfluentnahme im gestuften Betrieb.

[0038] Schließlich ist es vorteilhaft, wenn eine so genannte Stufungs-Vorwegnahme-Logik, die bei sich abzeichnender Zuschaltung der Hauptbrenner ein kurzzeitiges Befüllen der Hauptbrenner mit Brennstoff hervorruft. Dies geschieht mit dem Ziel, das Auftreten von Schubverlusten und Brennkammer-Instabilitäten im Verlaufe eines Stufungsvorganges (das heißt wenn zusätzlich zu den zuvor alleinig betriebenen Pilotbrennern nun auch die Hauptbrenner mit Brennstoff versorgt werden sollen) zu verhindern. Im Falle eines derartigen transienten Triebwerksmanövers kann es nämlich aufgrund des Auffüllvorgangs, des wenn auch kleinen Totvolumens der Hauptbrennerdüsen kurzzeitig zu einem Absinken des der Brennkammer zugeführten Gesamt-Brennstoffmassenstromes kommen. Dies kann nun durch eine so genannte Stufungs-Vorwegnahme-Logik verhindert werden, die während des Stufungsvorganges ein im Brennstoffsystem vorgesehenes Druckregelventil (Zumessventil des Gesamt-Brennstoffmassenstromes) kurzzeitig weiter öffnet, um einerseits den Brennstoffdruck in den Pilotbrennern und damit den Brennstoffdurchsatz durch die Pilotbrenner aufrechtzuerhalten als auch die Totvolumina in den Hauptbrennern schneller aufzufüllen. Sowohl der Zeitraum der Positionsänderung des Ventils als auch der Betrag der Positionsänderung werden in Abhängigkeit von Parametern bestimmt, die den stationären Betriebszustand und die Änderung dieses Betriebszustandes berücksichtigen. Gleichzeitig erfolgt dadurch während der Stufung auch eine gewisse Anreicherung des gesamten Brennstoff-

Luftverhältnisses in der Brennkammer, die notwendig ist, um die durch einen gewissen Zündverzug in der Hauptstufe der Brennkammer verzögert stattfindende Umsetzung des Brennstoffs in Wärme zu kompensieren. Daneben bestehen jedoch auch andere Möglichkeiten, bei einem sich abzeichnenden Stufungsvorgang kurzzeitig einen vergrößerten Brennstoffmassenstrom zur Verfügung zu stellen, um hiermit die Hauptbrenner vollständig zu befüllen und somit einen andernfalls möglicherweise kurzzeitig auftretenden Schubverlust zu verhindern.

[0039] Als Abfragebedingung für diese vorgeschlagene Funktion wird jeder mögliche Parameter beansprucht, der im Zusammenhang mit der implementierten Grundformel beziehungsweise den grundsätzlichen Regelgesetzen zum Stufungsvorgang steht sowie jede beliebige Kombination der Parameter untereinander, als auch die Möglichkeit einer Erweiterung der Abfragebedingung durch weitere Tabellen, die auf diesem Parameter basieren. Grundsätzlich muss hierfür die genannte Abfragebedingung lediglich auf geeigneten Tabellen basieren, die den zu erwarteten Verlust oder Überschuss des Gesamt-Brennstoffmassenstromes berücksichtigen.

[0040] Wie in Fig. 5 dargestellt, gibt somit der Splitwert (S) den aktuellen Wert der Aufteilung der Massenströme des Brennstoffs zu der Pilotstufe beziehungsweise der Hauptstufe der Brennkammer vor. Der Stufungspunkt (SPK) gibt eine Aussage, in welchem Modus sich das Brennstoffeinspritzsystem jeweils befindet, er gibt somit eine Zustandsanzeige ab. Mit ABS ist in Fig. 5 ein Absolutwert des Stufungspunktes bezeichnet, welcher stets positiv ist. Der nachgeschaltete Vergleicher, in welchen auch der Grenzwert eingeht, erzeugt daraufhin einen SPK-Stufungspunkt-Wert von 0 oder 1.

[0041] Weiterhin zeigt die Fig. 5, dass in das Kennfeld zur Steuerung des TIMERS die Ableitung der Hochdruckwellendrehzahl nach der Zeit eingeht. Wie in der Beschreibung vorstehend bereits erläutert, umfasst das Auswahlelement zwei Zustände, nämlich "T" für "true" und "F" für "falsch". In dem Zustand "T" wird, da der Wert $SPK^* = 1$ ist, der historische Wert von BZ (Betriebszustand), das heißt der Wert aus dem letzten Zeitschritt Z^{-1} verwendet. In der Legende der Fig. 5 wird mit SPK das Kommando für den Stufungspunkt bezeichnet, während SPK^* das zeitverzögerte Kommando für den Stufungspunkt bedeutet. Mit dem Zustand 0 wird ein ungestufter Betriebszustand der Brennkammer bezeichnet, bei dem die Pilotstufe an-, die Hauptstufe jedoch ausgeschaltet ist. Mit 1 wird ein Betriebszustand bezeichnet, bei welchem s_0 wohl die Pilotstufe als auch die Hauptstufe angeschaltet sind.

[0042] In diesem Zusammenhang sei noch eine Methode zur Vorauffüllung der zu den Hauptbrennern führenden Brennstoffleitungen beschrieben, die beim Anlassen des Triebwerks bevorzugt angewendet werden kann. Üblicherweise wird nämlich eine so genannte Brennstoffringleitung, die zu den Hauptbrennern führt,

bei jedem Abschalten des Triebwerks passiv, das heißt mit Luft, gespült und der darin befindliche Brennstoff in einen Spültank entleert. Beim Betrieb des Triebwerks ist es jedoch erforderlich, dass die Brennstoffringleitung zu den Hauptbrennerdüsen vollständig aufgefüllt ist, wenn vom ungestuften Pilotbetrieb zum gestuften Betrieb beziehungsweise Operationsmodus übergegangen werden soll. Dies ist eine Voraussetzung für den sicheren und stabilen Betrieb des Triebwerks über dessen gesamten Leistungsbereich. Daher ist eine besondere Maßnahme erforderlich, die sicherstellt, dass beim Anlassen des Triebwerks die Brennstoffringleitung zu den Hauptbrennern parallel mit dem Auffüllen der zu den Pilotbrennern führenden Brennstoffringleitung aufgefüllt wird. Hierfür wird die folgende Methode vorgeschlagen:

[0043] Vor jedem Anlassen des Triebwerks ist die Hauptbrenner-Ringleitung von Brennstoff leergespült. Wenn das Triebwerk angelassen wird (hierbei kann es sich um Bodenstarts und um Starts im Flug handeln), erfolgt zunächst ein über einen möglichst kurzen Zeitraum stattfindendes Auffüllen des gesamten Brennstoffleitungsvolumens zwischen der Brennstoffzumesseinheit beziehungsweise Steuer-Ventileinheit und den Einspritzdüsen der Pilotbrenner sowie der Hauptbrenner. Der schnelle Auffüllvorgang hält den Einspritzverzug in die Brennkammer und damit den dort stattfindenden Zündverzug so gering wie möglich. Hierfür ist eine zusätzliche Logik im elektronischen Triebwerksregler implementiert. Demzufolge werden zunächst mit einem erhöhten Brennstoffmassenstrom, der mehrfach oberhalb des Zünd-Brennstoffmassenstromes liegt, sämtliche Brennstoff-Ringleitungen aufgefüllt. Damit dieser Brennstoff auch in die zu den Hauptbrennern führenden Leitungen gelangen kann, wird die genannte Stufungs-Ventileinheit vorübergehend von der nur die Pilotbrenner beaufschlagenden Position in eine halb offene Position gefahren, in der auch die Hauptbrenner mit Brennstoff versorgt werden. Dadurch werden parallel zu den Pilotleitungen auch die zu den Hauptbrennern führenden Brennstoffleitungen aufgefüllt. Die entsprechende Öffnungszeit und die Öffnungsposition der Stufungs-Ventileinheit sind dabei geeignet vorbestimmt. Der Vorteil dieser Methode ist, dass auf die Überwachung des Füllzustandes der Leitung in/zur den Hauptbrennern verzichtet werden kann.

[0044] Um dabei sicherzustellen, dass die Hauptbrenner-Brennstoffleitungen vollständig gefüllt werden, ist der Brennstoffdruck in diesen Leitungen durch geeignete Positionierung der Stufungs-Ventileinheit selbstverständlich so groß zu halten, dass die Rückschlagventile in den Hauptbrenner-Einspritzdüsen kurzzeitig aufgedrückt werden und sowohl das sich bildende Luftpolster als auch eine geringe Brennstoffmenge in die Brennkammer hineingedrückt werden. Diese geringe Brennstoffmenge verbrennt danach in der Brennkammer zusammen mit dem gleichzeitig durch die Pilotbrenner eingespritzten Zünd-Brennstoffmassenstrom. Die

Hauptbrenner-Einspritzdüsen werden anschließend durch das passive Spülsystem wieder von Brennstoff freigespült, wodurch ein Verkoken der Hauptbrenner verhindert wird. Anschließend werden die Stufungs-Ventileinheit geschlossen (das heißt nur die Pilotbrenner sind zugeschaltet) und gleichzeitig der Brennstoffmassenstrom von der Brennstoffzumesseinheit beziehungsweise Steuer-Ventileinheit auf das Niveau des für die Zündung erforderlichen Zünd-Brennstoffmassenstroms reduziert. Die weitere Regelung der Brennstoffzufuhr bis zur Zündung und Beschleunigung wird wie bei einem Triebwerk mit einem konventionellen-System gehandhabt.

[0045] Im Folgenden wird die Erfindung anhand eines Ausführungsbeispiels in Verbindung mit der Zeichnung beschrieben. Dabei zeigt:

- Fig. 1 eine schematische Darstellung einer gestuften Brennkammer eines Fluggasturbinen-Triebwerks,
- Fig. 2 eine schematische Teilansicht eines erfindungsgemäßen Triebwerkreglers,
- Fig. 3 ein Teil-Prinzipschaltbild des erfindungsgemäßen Triebwerkreglers,
- Fig. 4 ein weiteres Teil-Prinzipschaltbild des erfindungsgemäßen Triebwerkreglers, und
- Fig. 5 ein Prinzipschaltbild zur Umsetzung in einer digitalen elektronischen Steuereinheit bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Brennstoffeinspritzsystems.

[0046] In Figur 1, in welcher ein üblicher Teil-Schnitt durch eine gestufte Ring-Brennkammer eines Fluggasturbinen-Triebwerks dargestellt ist, ist mit der Bezugsziffer 1 die Brennkammer und mit der Bezugsziffer 2 der Austritt aus dieser Brennkammer 1 bezeichnet. In die Brennkammer 1 gelangt gemäß den dargestellten Pfeilen ein von einem vorgeschalteten Kompressor geförderter und dabei verdichteter Gasstrom beziehungsweise Luftstrom hinein, der den benötigten Sauerstoff mitführt, um den über den (beziehungsweise die mehrfach vorhandenen ringförmig angeordneten) Pilotbrenner 3 sowie ggf. über den (beziehungsweise die mehrfach vorhandenen ringförmig angeordneten) Hauptbrenner 4 in die Brennkammer 1 eingebrachten Brennstoff (dieser ist punktiert dargestellt) in der Brennkammer 1 zu verbrennen. Die Verbrennungs-Abgase gelangen dann durch den Brennkammer-Austritt 2 gemäß Pfeil zunächst in die Turbine des Triebwerks.

[0047] Die Brennkammer 1 ist räumlich unterteilt in eine Pilotzone 1a, die sich direkt stromab der Pilotbrenner 3 befindet, sowie in eine sich in Strömungsrichtung der Gase daran anschließende Hauptzone 1b, in die die

Hauptbrenner 4 den Brennstoff abgeben. Letzteres, das heißt eine Brennstoffzufuhr in die Hauptzone 1b der Brennkammer 1 über die Hauptbrenner 4 geschieht jedoch nur in solchen Betriebspunkten des Triebwerks, in denen eine höhere Leistungsentfaltung beziehungsweise Leistungsabgabe gefordert wird. Ständig hingegen gelangt über die Pilotbrenner 3 Brennstoff in die Brennkammer 1. In Abhängigkeit vom jeweiligen Betriebspunkt des Fluggasturbinen-Triebwerks gelangen somit zwischen 10% und 100% des gesamten zugeführten Brennstoffmassenstromes über die Pilotbrenner 3 in die Brennkammer 1, während demzufolge über die Hauptbrenner 4 bei hoher Triebwerksleistung 90% und bei niedriger Triebwerksleistung 0% des Gesamt-Brennstoffmassenstromes in die Brennkammer 1 eingeleitet werden.

[0048] In Figur 2 ist ein erfindungsgemäßes Brennstoffeinspritzsystem, mit welchem die Pilotbrenner 3 sowie die Hauptbrenner 4 mit Brennstoff versorgt werden, schematisch und dabei stark vereinfacht dargestellt. Der Pfeil WF verdeutlicht dabei den Gesamt-Brennstoffmassenstrom, der über eine Steuer-Ventileinheit 6 dosiert und damit an einen bestimmten Betriebspunkt des Triebwerks angepasst in die Brennkammer 1 eingeleitet wird. Eine so genannte Stufungs-Ventileinheit 7 stellt dabei ein, welcher Anteil dieses Gesamt-Brennstoffmassenstromes WF gemäß Pfeil 3' den Pilotbrennern 3 und welcher (damit komplementär zusammenhängende) Anteil dieses Gesamt-Brennstoffmassenstromes WF gemäß Pfeil 4' den Hauptbrennern 4 zugeführt wird.

[0049] Mit der Bezugsziffer 8 ist der (elektronische) Triebwerksregler bezeichnet, der üblicherweise mehrere Regelblöcke enthält. Hier ist nun ein erster Regelblock 8a dargestellt, der die Steuer-Ventileinheit 6 betätigt beziehungsweise geeignet positioniert oder einstellt, und der hierfür geeignete (übliche) Triebwerkregelgesetze enthält beziehungsweise berücksichtigt. Ferner ist ein zweiter Regelblock 8b dargestellt, der die Stufungs-Ventileinheit 7 kontrolliert und demzufolge Regelgesetze für die gestufte Verbrennung enthält beziehungsweise berücksichtigt. Dieser Regelblock 8b bestimmt somit den so genannten Splitwert S, der die Aufteilung des Gesamt-Brennstoffmassenstromes WF auf die Pilotbrenner 3 sowie auf die Hauptbrenner 4 kennzeichnet und stellt die Stufungs-Ventileinheit 7 dementsprechend ein.

[0050] Figur 3 zeigt schematisch und stark vereinfacht die Berechnung der Aufteilung des Gesamt-Brennstoffmassenstromes WF auf die Pilotbrenner 3 (Brennstoffstrom 3' in Fig. 2) und die Hauptbrenner 4 (Brennstoffstrom 4' in Fig. 2), wobei diese Aufteilung durch einen so genannten Splitwert S beschrieben wird. Wie weiter oben ausführlich erläutert wurde, wird hierbei auf die bekannten Größen

WF = Gesamt-Brennstoffmassenstrom,
 P30 = Gasdruck am Brennkammer-Eintritt,
 T30 = Gastemperatur am Brennkammer-Eintritt,

oder
 T44 = Total-Temperatur stromab der Triebwerks-Hochdruckturbine

gegebenenfalls auch auf

T20 = Gastemperatur am Triebwerks-Eintritt

zurückgegriffen. Hieraus ergibt sich nach obigen Erläuterungen der so genannte Stufungsparameter SP.

[0051] Ferner kann noch die zeitliche Änderung der Drehzahl der Hochdruckwelle des Triebwerks, das heißt der Quotient $(dNH / dt)_{Ref}$ berücksichtigt werden, wie dies unten in Verbindung mit Anspruch 3 erläutert wird.

[0052] Über Kennfelder 5 ergibt sich hiermit ein Splitwert S', der zunächst noch über ein an sich übliches Low-Win-Glied 9a sowie ein High-Win-Glied 9b geführt wird, woraus sich ein nominaler Splitwert S* ergibt. Das Low-Win-Glied 9a berücksichtigt dabei einen maximalen Splitwert MAX (dieser entspricht 100% Brennstoffanteil für die Pilotbrenner 3), während das High-Win-Glied 9b einen minimalen Splitwert MIN berücksichtigt, der zwischen 10% und 40% Brennstoffanteil für die Pilotbrenner 3 liegen kann. Auch diesbezüglich wird auf die Erläuterungen zu Patentanspruch 3 verwiesen.

[0053] In Figur 4 ist eine bevorzugte Art der Limitierung der Brennstoffaufteilung auf die Pilotbrenner 3 sowie auf die Hauptbrenner 4 dargestellt. Diesbezüglich wird auf die Erläuterungen zu Patentanspruch 5 verwiesen. Ein (zeitliches) Differenzierglied für den nominalen Splitwert S* trägt die Bezugsziffer 10 und der im obigen Beschreibungsabschnitt zu Anspruch 5 genannte Limiter die Bezugsziffer 11. Der Grenzwert, der für diese Abfrage ggf. berücksichtigt wird, ist als Eingangsgröße mit der Bezugsziffer 12 bezeichnet und kann bspw. 50% betragen. Bei einer Stufung vom Pilotbetrieb in den so genannten Dualbetrieb - (in diesem werden die Pilotbrenner und die Hauptbrenner betrieben) - durchläuft der kommandierte Splitwert den Bereich zwischen 100% und 40%. Erst ab einem Pilotbrennstoffanteil unterhalb von 50% erfolgt die Limitierung der Brennstoff-Aufteilung auf die Pilotbrenner. Dies bedeutet, dass der Anteil 4' am Gesamt-Brennstoffmassenstrom WF, der über die Hauptbrenner 4 in die Brennkammer 1 gelangen kann, im Bereich zwischen 0% und 50% liegen kann.

[0054] Figur 5 schließlich zeigt ein Schemata zur bevorzugten Berechnung des Operationsmodus der Brennkammer 1, das heißt ob diese im Pilotbetrieb oder im gestuften Betrieb gefahren wird. Die Ausgangsgröße dieses Schematas ist eine digitale Ja/Nein-Größe, die angibt, ob die Hauptbrenner 4 mit Brennstoff versorgt werden oder nicht.

[0055] Neben dem berechneten Splitwert S* (nominaler Stufungspunkt), sowie dem aktuellen Splitwert "Actual" gehen dabei in diese Festlegung beziehungsweise Berechnung des Stufungspunktes wie ersichtlich additiv mehrere Korrekturglieder ΔSP ein, so wie dies ebenfalls bereits ausführlich erläutert wurde. Diese ein-

zelnen Korrekturglieder, die zu ΔSP aufsummiert werden, berücksichtigen dabei - wie bereits erläutert wurde - über geeignete Kennfelder 5 mehrere Einflussparameter. Die Berücksichtigung der Lastwechselgeschwindigkeit ist dabei auch mit "Transient" und diejenige der Flughöhe auch mit "Altitude" bezeichnet. Die ein Umschalten vom ungestuften Pilotbetrieb in den gestuften Operationsmodus unterhalb des Leerlaufbetriebszustandes des Triebwerkes verhindernde Funktion ist auch mit "Idle" bezeichnet, und diejenige Funktion, die einen Absolutwert für den Gasdruckes (P30) und/oder die Gastemperatur (T30) am Brennkammer-Eintritt berücksichtigt, um einen stabilen Betrieb der Brennkammer sicherzustellen, ist auch mit "Stability" bezeichnet.

[0056] Mit den soweit beschriebenen Merkmalen ergibt sich ein Brennstoffeinspritzsystem für eine gestufte Brennkammer insbesondere eines Fluggasturbinen-Triebwerks, mit der ein im Wesentlichen optimaler Betrieb dieser Brennkammer 1 ermöglicht wird. Möglich ist insbesondere eine schadstoffoptimierte kennfeldgestützte Regelung der gestuften Verbrennung im quasistationären Betrieb. Die im Regelblock 8b des Triebwerksreglers 8 implementierbaren und weiter oben beschriebenen Regelgesetze für die gestufte Verbrennung erlauben einen Betrieb einer beziehungsweise der gestuften Brennkammer 1 im ungestuften Pilotbetrieb und im gestuften Modus ohne signifikantem Einfluss auf die Sicherheit, Stabilität und das Schubvermögen des gesamten Triebwerkes während eines Stufungsvorganges, worunter ein Umschaltvorgang zwischen den beiden Operationsmodi verstanden wird. Insbesondere wird ein nahezu schubverlustfreier Übergang vom Betriebszustand mit alleiniger Beaufschlagung der Pilotbrenner 3 in den gestuften Betrieb, in dem neben den Pilotbrennern 3 auch den Hauptbrennern 4 Brennstoff zugemessen wird, gewährleistet. Der so genannte Stufungsvorgang beansprucht dabei vorteilhafterweise nicht die vorhandene Stabilitätsreserve des Verdichters.

[0057] Die stufenlos einstellbare Stufungs-Ventileinheit 7 stellt sicher, dass sowohl das Emissionsniveau der Brennkammer insbesondere bezüglich NO_x als auch das Temperaturprofil am der Brennkammer 1 nachgeschalteten Turbineneintritt über dem gesamten Betriebsbereich des Triebwerks optimiert ist. Die gewählte Methode der Einstellung des Brennstoffsplits, das heißt des Splitwerts S, auf die Pilotbrenner 3 und die Hauptbrenner 4 ermöglicht damit eine flexible Aufteilung des Brennstoffs entsprechend den aktuellen Anforderungen an das Regelsystem im jeweiligen Betriebszustand. Damit erlaubt diese Methode neben einer optimalen Einstellung der Brennstoffaufteilung zur Minimierung der Schadstoffemissionen auch eine Optimierung des Betriebsverhaltens der Brennkammer hinsichtlich Verbrennungsstabilität, Ausbrandverhalten und des Temperaturaustrittsprofils über dem gesamten Lastbereich des Triebwerks.

[0058] Wie beschrieben erfolgt bevorzugt ein getrenntes Erfassen der wesentlichen Einflussfaktoren,

wie z.B. Flughöhe, transiente Betriebsmanöver auf den Stufungspunkt sowie die korrekte Einstellung der Brennstoffaufteilung auf beide Brennstoffkreise im gestuften Modus. Alle wesentlichen Einflüsse auf die Stufungscharakteristik werden über einfache Kennfelder erfasst und deren Einfluss additiv sowohl auf den Stufungspunkt als auch auf den Brennstoffsplit, das heißt auf den Splitwert S, berücksichtigt. Damit wird sowohl eine Optimierung der Verbrennung in den beiden Brennkammerzonen, nämlich der Pilotzone 1a und der Hauptzone 1b, als auch die Einhaltung der Stabilität der Verbrennung gewährleistet.

[0059] Generell ergibt sich eine verbesserte Regelqualität aufgrund der Verwendung von gut messbaren Triebwerks-Parametern, wie WF, P30, T30 u.a. Eine Synthetisierung von Triebwerks-Parametern wird hierdurch vermieden. Auch kann bei Implementierung der so genannten Stufungs-Vorwegnahme-Logik während eines Stufungsvorganges eine signifikante Verminderung des Triebwerk-Schubes verhindert werden. Auch die beschriebene Berücksichtigung eines Anlassvorganges ist in einem erfindungsgemäßen Brennstoffeinspritzsystem äußerst vorteilhaft. Schließlich ist die Software zur Regelung des Stufungsprozesses einfach in einen vorhandenen Triebwerksregler integrierbar, wobei noch darauf hingewiesen sei, dass selbstverständlich eine Vielzahl von Details abweichend von obigen Erläuterungen gestaltet sein kann, ohne den Inhalt der Patentansprüche zu verlassen.

[0060] Zusammenfassend ist Folgendes festzustellen:

[0061] Die Erfindung betrifft ein Brennstoffeinspritzsystem für eine gestufte Brennkammer 1 eines Fluggasturbinen-Triebwerks, deren Pilotbrenner 3 stets mit einer gewissen Brennstoffmenge versorgt wird/werden, während deren Hauptbrenner(n) 4 nur bei höherer Triebwerksleistung Brennstoff zugemessen wird, wobei stromab einer die gesamte Brennstoffmenge bestimmenden Steuer-Ventileinheit 6 eine diesen Gesamt-Brennstoffmassenstrom (WF) auf die Pilotbrenner 3 sowie auf die Hauptbrenner 4 veränderbar aufteilende Stufungs-Ventileinheit 7 vorgesehen ist, die beide von einem Triebwerksregler 8 angesteuert werden, der für die Ansteuerung der Stufungs-Ventileinheit 7 die gewünschte Triebwerksleistung zugrunde legt, dadurch gekennzeichnet, dass die Triebwerksleistung durch die Belastung der Gasturbinen-Brennkammer 1 in Form eines so genannten Stufungsparameters (SP) charakterisiert ist, anhand dessen die Stufungs-Ventileinheit 7 entsprechend einer Schaltgeraden angesteuert wird, dass der Stufungsparameter (SP) aus einem funktionalen Zusammenhang abgeleitet wird, dass eine nachgeschaltete Summationsstelle zur Berechnung der Differenz zwischen einem aktuellen Wert des Stufungspunktes und einem Wert des nominalen Stufungspunktes vorgesehen ist, und dass der Summationsstelle ein Zeitelement (TIMER) nachgeordnet ist, welches so ausgebildet ist, dass nach dem Über- beziehungsweise Un-

terschreiten des angepassten Stufungspunktes der Umschaltvorgang zeitlich verzögert wird, wenn die Zeitdauer seit dem Ausführen der letzten Stufung kleiner ist als eine vordefinierte Zeitkonstante, die in einem Kennfeld abgelegt ist.

Patentansprüche

1. Brennstoffeinspritzsystem für eine gestufte Brennkammer (1) eines Fluggasturbinen-Triebwerks, deren Pilotbrenner (3) stets mit einer gewissen Brennstoffmenge versorgt wird/werden, während deren Hauptbrenner(n) (4) nur bei höherer Triebwerksleistung Brennstoff zugemessen wird, wobei stromab einer die gesamte Brennstoffmenge bestimmenden Steuer-Ventileinheit (6) eine diesen Gesamt-Brennstoffmassenstrom (WF) auf die Pilotbrenner (3) sowie auf die Hauptbrenner (4) veränderbar aufteilende Stufungs-Ventileinheit (7) vorgesehen ist, die beide von einem Triebwerksregler (8) angesteuert werden, der für die Ansteuerung der Stufungs-Ventileinheit (7) die gewünschte Triebwerksleistung zugrunde legt, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Triebwerksleistung durch die Belastung der Gasturbinen-Brennkammer (1) in Form eines so genannten Stufungsparameters (SP) charakterisiert ist, anhand dessen die Stufungs-Ventileinheit (7) entsprechend einer Schaltgeraden angesteuert wird, dass der Stufungsparameter (SP) aus einem funktionalen Zusammenhang abgeleitet wird, dass eine nachgeschaltete Summationsstelle zur Berechnung der Differenz zwischen einem aktuellen Wert des Stufungspunktes und einem Wert des nominalen Stufungspunktes vorgesehen ist, und dass der Summationsstelle ein Zeitelement (TIMER) nachgeordnet ist, welches so ausgebildet ist, dass nach dem Über- beziehungsweise Unterschreiten des angepassten Stufungspunktes der Umschaltvorgang zeitlich verzögert wird, wenn die Zeitdauer seit dem Ausführen der letzten Stufung kleiner ist als eine vordefinierte Zeitkonstante, die in einem Kennfeld abgelegt ist.
2. Brennstoffeinspritzsystem nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Zeitelement (TIMER) aktivierbar ist, sobald der aktuelle Wert des Stufungspunktes einen Wert 1 annimmt.
3. Brennstoffeinspritzsystem nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Zeitelement (TIMER) mittels einer Kennfeldsteuerung ansteuerbar ist.
4. Brennstoffeinspritzsystem nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Kennfeldsteuerung zur Abgabe eines Steuerungsparameters $t_{\text{MIN, Stufung}}$ an das Zeitelement (TIMER) ausgebildet

ist.

5. Brennstoffeinspritzsystem nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Steuerungsparameter bei schnellem Lastweg klein und bei langsamem Lastweg groß eingestellt ist. 5
6. Brennstoffeinspritzsystem nach einem der Ansprüche 3 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Kennfeldsteuerung für das Zeitelement (TIMER) als Eingangsgröße die Ableitung der Hochdruckturbinenwellendrehzahl nach der Zeit (dN_H/dt) zuleitbar ist. 10
7. Brennstoffeinspritzsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Ausgangswert SPK^* des Zeitelements (TIMER) einem Auswahlelement zuleitbar ist. 15
8. Brennstoffeinspritzsystem nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Auswahlelement so ausgebildet ist, dass bei $SPK^* = 0$ der aktuelle Wert der Stufungspunktberechnung herangezogen wird und dass bei $SPK^* = 1$ der Wert des letzten Zeitschritts (Z^{-1}) verwendet wird 20 25
9. Brennstoffeinspritzsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Stufungsparameter (SP) aus einem funktionalen Zusammenhang abgeleitet wird: 30
 - {Gesamt-Brennstoffmassenstrom (WF)} dividiert durch {Gasdruck am Brennkammer-Eintritt (P30)} multipliziert mit {Gastemperatur am Brennkammer-Eintritt (T30)}, 35
das heißt $SP = \text{Funktion von } [WF / P30 \cdot T30]$ oder
 - {Gesamt-Brennstoffmassenstrom (WF)} dividiert durch {Gasdruck am Brennkammer-Eintritt (P30)} multipliziert mit {Quadratwurzel der Gastemperatur am Brennkammer-Eintritt (T30)}, 40
das heißt $SP = \text{Funktion von } [WF / P30 \cdot (T30)^{1/2}]$ oder 45
 - {Gesamt-Brennstoffmassenstrom (WF)} dividiert durch {Gasdruck am Brennkammer-Eintritt (P30)} multipliziert mit {Quadratwurzel des Quotienten aus der Gastemperatur am Brennkammer-Eintritt (T30) und der Gastemperatur am Triebwerks-Eintritt (T20)}, 50
das heißt $SP = \text{Funktion von } [WF / P30 \cdot (T30 / T20)^{1/2}]$ oder
 - {Gesamt-Brennstoffmassenstrom (WF)} dividiert durch {Gasdruck am Brennkammer-Eintritt (P30)} multipliziert mit {Total-Temperatur 55

(T44) stromab der Hochdruckturbine oder der Quadratwurzel hiervon},

das heißt $SP = \text{Funktion von } [WF / P30 \cdot T44]$, oder

$SP = \text{Funktion von } [WF / P30 \cdot (T44)^{1/2}]$

10. Brennstoffeinspritzsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** bezüglich des Zuschaltens sowie des Abschaltens der Hauptbrenner (4) vorgesehen ist, dass bei Ansteigen der Triebwerksleistung über den Stufungspunkt die Hauptbrenner zugeschaltet und bei Absinken der Triebwerksleistung unter den Stufungspunkt die Hauptbrenner abgeschaltet werden, und dass zu einem Grundwert des Stufungspunktes, der insbesondere aus einem Kennfeld ermittelt wird, zumindest ein Korrekturglied (ΔSP) in Form eines Offsets addiert wird, durch welches einer der folgenden Einflussparameter berücksichtigt wird:

- Absolutwert des Gasdruckes (P30) und/oder der Gastemperatur (T30) am Brennkammer-Eintritt
- korrigierte Drehzahl des Hochdruckverdichters (N2RT20) und Gasdruck am Triebwerkeintritt (P20)
- Flughöhe und/oder ausgewählte Umgebungsbedingungen
- Lastwechselgeschwindigkeit
- Verdichterpumpen

11. Brennstoffeinspritzsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei aus dem Stufungsparameter (SP) über ein Kennfeld ein so genannter Splitwert (S) ermittelt wird, der die Brennstoffaufteilung auf die Pilotbrenner (3) und die Hauptbrenner (4) beschreibt und anhand dessen die Stufungs-Ventileinheit (7) angesteuert wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** in Instationärzuständen des Triebwerkes der Splitwert (S) durch einen Korrekturfaktor angepasst wird, der in Abhängigkeit von der zeitlichen Änderung der Drehzahl insbesondere der Hochdruck-Welle des Triebwerks ermittelt wird.

12. Brennstoffeinspritzsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** auf einen Grenz-Ersatzwert für den Splitwert zurückgegriffen wird, wenn der zeitlich differenzierte berechnete Splitwert einen Grenz-Differenzenwert überschreitet.

13. Brennstoffeinspritzsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** während eines Stufungsvorganges, bei welchem die Hauptbrenner (4) zugeschaltet oder abgeschaltet werden, initiiert durch den Triebwerksregler (8) eine Änderung der Zapfluft-Entnahmerate aus dem

Triebwerk verhindert wird.

14. Brennstoffeinspritzsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 13, **gekennzeichnet durch** eine Stufungs-Vorwegnahme-Logik, die bei sich abzeichnender Zuschaltung der Hauptbrenner (4) ein kurzzeitiges Befüllen der Hauptbrenner verursacht.
15. Brennstoffeinspritzsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** während eines Anlassvorganges des Triebwerks die Kraftstoffleitungen zu den Hauptbrennern gleichzeitig mit den Leitungen zu den Pilotbrennern befüllt werden, ohne den Füllzustand in den Hauptbrenner-Leitungen zu messen.

Claims

1. Fuel injection system for a staged combustion chamber (1) of a gas turbine aero-engine, in which a certain quantity of fuel is permanently supplied to the pilot burner(s) (3) and in which fuel is apportioned to the main burner(s) (4) only at higher engine performance, whereby a staging valve unit (7) which variably splits the total fuel mass flow (WF) to the pilot burners (3) and to the main burners (4) is provided downstream of a control valve unit (6) which controls the entire fuel mass flow, with both valve units being actuated by an engine controller (8) and with the actuation of the staging valve unit (7) being accomplished on the basis of the desired engine performance, **characterized in that** the engine performance is described by way of a staging parameter (SP) reflecting the load of the gas turbine combustion chamber (1) and actuating the staging control unit (7) according to a switching line, **in that** the staging parameter (SP) is derived from a functional relationship, **in that** a downstream summation point is provided for the computation of the difference between an actual value of the staging point and a value of the nominal staging point, and **in that** a time element (TIMER) is provided subsequent to the summation point, said time element being designed such that switch-over is delayed upon overshooting or undershooting of the adjusted staging point, respectively, if the period since the execution of the previous staging event is smaller than a pre-defined time constant held in a diagram of characteristics.
2. Fuel injection system in accordance with Claim 1, **characterized in that** provision is made for the actuation of the time element (TIMER) when the actual value of the staging point is 1.
3. Fuel injection system in accordance with Claim 1 or 2, **characterized in that** provision is made for ac-

tuating the time element (TIMER) by way of a characteristics-based control.

4. Fuel injection system in accordance with Claim 3, **characterized in that** the characteristics-based control is designed for the output of a control parameter $t_{\text{MIN, staging}}$ to the time element (TIMER).
5. Fuel injection system in accordance with Claim 4, **characterized in that** the control parameter is set small for rapid load changes and is set large for slow load changes.
6. Fuel injection system in accordance with one of the Claims 3 to 5, **characterized in that** provision is made for inputting the time derivation of the rotational speed of the high-pressure turbine shaft (dN/dt) to the characteristics-based control for the time element (TIMER).
7. Fuel injection system in accordance with one of the Claims 1 to 6, **characterized in that** provision is made for inputting the output value SPK* of the time element (TIMER) to a selector element.
8. Fuel injection system in accordance with Claim 7, **characterized in that** the selector element is designed such that the actual value of the staging point computation is used for $\text{SPK}^* = 0$ and that the value of the last time step (Z^{-1}) is applied for $\text{SPK}^* = 1$.
9. Fuel injection system in accordance with one of the Claims 1 to 8, **characterized in that** the staging parameter (SP) is derived from a functional relationship:
- {Total fuel mass flow (WF)} divided by {gas pressure at combustion chamber entry (P30)} multiplied by {gas temperature at combustion chamber entry (T30)},
i.e. $\text{SP} = \text{function of } [WF / P30 \cdot T30]$ or
 - {Total fuel mass flow (WF)} divided by {gas pressure at combustion chamber entry (P30)} multiplied by {square root of the gas temperature at the combustion chamber entry (T30)},
i.e. $\text{SP} = \text{function of } [WF / P30 \cdot (T30)^{1/2}]$ or
 - {Total fuel mass flow (WF)} divided by {gas pressure at combustion chamber entry (P30)} multiplied by {square root of the quotient of the gas temperature at the combustion chamber entry (T30) and the gas temperature at the engine inlet (T20)},
i.e. $\text{SP} = \text{function of } [WF / P30 \cdot (T30 / T20)^{1/2}]$ or

- {Total fuel mass flow (WF)} divided by {gas pressure at combustion chamber entry (P30)} multiplied by {total temperature(T44) downstream of the high-pressure turbine or square root thereof},
i.e. $SP = \text{function of } [WF / P30 \cdot T44]$, or
 $SP = \text{function of } [WF / P30 \cdot (T44)^{1/2}]$. 5
- 10. Fuel injection system in accordance with one of the Claims 1 to 9, **characterized in that** - with regard to the switching in and the switching off of the main burners (4) - the main burners are switched in when the engine performance rises above the staging point and **in that** the main burners are switched off when the engine performance falls below the staging point, and **in that** at least one correction element (ΔSP) is added to a basic value of the staging point in the form of an offset, said staging point being established especially from a diagram of characteristics, and said correction element reflecting one of the following influencing parameters: 10
 - Absolute value of the gas pressure (P30) and/or the gas temperature (T30) at the combustion chamber entry 25
 - Corrected speed of the high-pressure compressor (N2RT20) and gas pressure at the engine inlet (P20)
 - Flight altitude and/or selected ambient conditions 30
 - Rate of load change
 - Compressor surge
- 11. Fuel injection system in accordance with one of the Claims 1 to 10, whereby a so-called split value (S) is determined from the staging parameter (SP) via a diagram of characteristics, said split value describing the fuel apportionment between the pilot burners (3) and the main burners (4) and being used to control the staging valve unit (7), **characterized in that** the split value (S) is adjusted for transient states of the engine by way of a correction factor which is established in dependence of the time change of the rotational speed of the high-pressure shaft of the engine, in particular. 40
- 12. Fuel injection system in accordance with one of the Claims 1 to 11, **characterized in that** recourse is made to a substitute limiting value for the split value if the time-differentiated split value exceeds a limiting differential value. 50
- 13. Fuel injection system in accordance with one of the Claims 1 to 12, **characterized in that** a change of the engine air bleed rate is precluded during a staging event in which the main burners (4) are activated or de-activated, initiated by the engine controller (8). 55

14. Fuel injection system in accordance with one of the Claims 1 to 13, **characterized in that** a staging anticipation logic provides for short-term filling of the main burners (4) if their activation is imminent.

15. Fuel injection system in accordance with one of the Claims 1 to 14, **characterized in that** during start-up of the engine the fuel lines to the main burners and the fuel lines to the pilot burners are filled simultaneously without measuring the filling state in the main burner lines.

Revendications

1. Système d'injection de combustible pour une chambre de combustion étagée (1) d'un moteur d'avion à turbine à gaz, dont le(s) brûleur(s) pilote(s) 3 est/sont alimentés en permanence par une certaine quantité de combustible, alors que le/les brûleur(s) principal/principaux (4) ne reçoit(ven)t du combustible que pour des puissances élevées du moteur, sachant qu'en aval d'une unité de vanne de commande (6) déterminant la quantité globale de combustible est prévue une unité de vanne d'étagement (7) qui répartit de manière modifiable ce flux massique global de combustible (WF) dans les brûleurs pilotes (3) ainsi que dans les brûleurs principaux (4), que les deux unités sont activées par un régulateur de moteur (8) qui se base sur la puissance de moteur souhaitée pour activer l'unité de vanne d'étagement (7), **caractérisé en ce que** la puissance du moteur est exprimée par la charge de la chambre de combustion (1) de la turbine à gaz sous forme d'un paramètre dit d'étagement (SP), à l'aide duquel l'unité de vanne d'étagement (7) est activée selon une droite de commutation, que le paramètre d'étagement (SP) est dérivé d'une relation fonctionnelle, qu'un élément totalisateur est prévu en aval pour calculer la différence entre une valeur momentanée du point d'étagement et une valeur du point d'étagement nominal, et qu'en aval de l'élément totalisateur est placé un élément de temps (TIMER) configuré de telle manière qu'après le dépassement vers le haut ou le bas du point d'étagement ajusté, la commutation est retardée dans le temps quand le temps écoulé depuis l'exécution du dernier étagement est inférieur à une constante de temps prédéfinie enregistrée dans un diagramme caractéristique.
2. Système d'injection de combustible selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** l'élément de temps (TIMER) peut être activé, dès que la valeur momentanée du point d'étagement prend la valeur 1.
3. Système d'injection de combustible selon la reven-

dication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** l'élément de temps (TIMER) peut être activé au moyen d'une commande à diagrammes caractéristiques.

4. Système d'injection de combustible selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** la commande à diagrammes caractéristiques est configurée pour transmettre un paramètre de commande t_{MIN} , étagement à l'élément de temps (TIMER). 5
5. Système d'injection de combustible selon la revendication 4, **caractérisé en ce que** le paramètre de commande est réglé petit en cas de course de charge rapide et grand en cas de course de charge lente. 10
6. Système d'injection de combustible selon une des revendications 3 à 5, **caractérisé en ce que** la dérivée par rapport au temps du régime de l'arbre de la turbine haute pression (dNH/dt) peut être transmise à la commande à diagrammes caractéristiques comme grandeur d'entrée pour l'élément de temps (TIMER). 20
7. Système d'injection de combustible selon une des revendications 1 à 6, **caractérisé en ce que** la valeur de sortie SPK* de l'élément de temps (TIMER) peut être transmise à un élément de sélection. 25
8. Système d'injection de combustible selon la revendication 7, **caractérisé en ce que** l'élément de sélection est configuré de telle manière que si $SPK^* = 0$, la valeur momentanée du calcul du point d'étagement est prélevée, et si $SPK^* = 1$, la valeur du dernier pas de temps (Z^{-1}) est utilisée. 30 35
9. Système d'injection de combustible selon une des revendications 1 à 8, **caractérisé en ce que** le paramètre d'étagement (SP) est dérivé d'une relation fonctionnelle: 40
 - {Flux massique global de combustible (WF)} divisé par la {pression gazeuse (P30) à l'entrée de la chambre de combustion}, multiplié par la {température du gaz (T30), à l'entrée de la chambre de combustion}, c'est-à-dire que SP est une fonction de $[WF / P30 \cdot T30]$, ou 45
 - {Flux massique global de combustible (WF)} divisé par la {pression gazeuse (P30) à l'entrée de la chambre de combustion}, multiplié par la {racine carrée de la température du gaz (T30) à l'entrée de la chambre de combustion}, c'est-à-dire que SP est une fonction de $[WF / P30 \cdot (T30)^{1/2}]$, ou 50
 - {Flux massique global de combustible (WF)} divisé par la {pression du gaz (P30) à l'entrée de

la chambre de combustion}, multiplié par la {racine carrée du quotient de la température du gaz (T30), à l'entrée de la chambre de combustion par la température du gaz (T20) à l'entrée du moteur}, c'est-à-dire que SP est une fonction de $[WF / P30 \cdot (T30 / T20)^{1/2}]$, ou

- {Flux massique global de combustible (WF)} divisé par la {pression gazeuse (P30) à l'entrée de la chambre de combustion}, multiplié par la {température totale (T44) en aval de la turbine haute pression ou multiplié par la racine carrée de cette valeur}, c'est-à-dire que SP est une fonction de $[WF / P30 \cdot T44]$, ou SP est une fonction de $[WF / P30 \cdot (T44)^{1/2}]$.
10. Système d'injection de combustible selon une des revendications 1 à 9, **caractérisé en ce que** concernant la mise en et hors service des brûleurs principaux (4), il est prévu qu'en cas de montée de la puissance du moteur au-delà du point d'étagement, les brûleurs principaux sont mis en service, et qu'en cas de baisse de la puissance du moteur en deçà du point d'étagement, les brûleurs principaux sont mis hors service, et qu'à une valeur de base du point d'étagement déterminée en particulier à partir d'un diagramme caractéristique est ajouté au moins un terme correctif (ΔSP) sous forme d'un décalage au moyen duquel un des paramètres d'influence suivants est pris en compte :
 - Valeur absolue de la pression gazeuse (P30) et/ou de la température du gaz (T30) à l'entrée de la chambre de combustion,
 - Régime corrigé du compresseur haute pression (N2RT20) et la pression gazeuse à l'entrée du moteur (P20),
 - Hauteur de vol et/ou conditions environnementales spécifiques,
 - Vitesse d'alternances de charges,
 - Pompage du compresseur.
 11. Système d'injection de combustible selon une des revendications 1 à 10, dans lequel est déterminée à partir du paramètre d'étagement (SP) au moyen d'un diagramme caractéristique une valeur dite de fractionnement (S) qui exprime la répartition du combustible dans les brûleurs pilotes (3) et les brûleurs principaux (4) et à l'aide de laquelle est activée l'unité de vanne d'étagement (7), **caractérisé en ce que**, dans des états instationnaires du moteur, la valeur de fractionnement (S) est ajustée par un facteur correctif calculé en fonction de la variation dans le temps du régime, en particulier du régime de l'arbre haute pression du moteur.
 12. Système d'injection de combustible selon une des revendications 1 à 11, **caractérisé en ce qu'on a**

recours à une valeur limite de remplacement pour la valeur de fractionnement lorsque la valeur de fractionnement calculée puis différenciée par rapport au temps dépasse une valeur différentielle limite.

5

13. Système d'injection de combustible selon une des revendications 1 à 12, **caractérisé en ce que** pendant une opération d'étagement dans laquelle les brûleurs principaux (4) sont mis en ou hors service, initiée par le régulateur du moteur (8), une modification du taux de prélèvement d'air de purge sur le moteur est évitée.

10

14. Système d'injection de combustible selon une des revendications 1 à 13, **caractérisé par** une logique d'étagement anticipatrice qui provoque un bref remplissage des brûleurs principaux en combustible lorsque s'annonce la mise en service des brûleurs principaux.

15

20

15. Système d'injection de combustible selon une des revendications 1 à 14, **caractérisé en ce que** pendant un démarrage du moteur, les conduites de combustible menant aux brûleurs principaux sont remplies en même temps que les conduites de combustible menant aux brûleurs pilotes, sans que soit mesuré l'état de remplissage des conduites des brûleurs principaux.

25

30

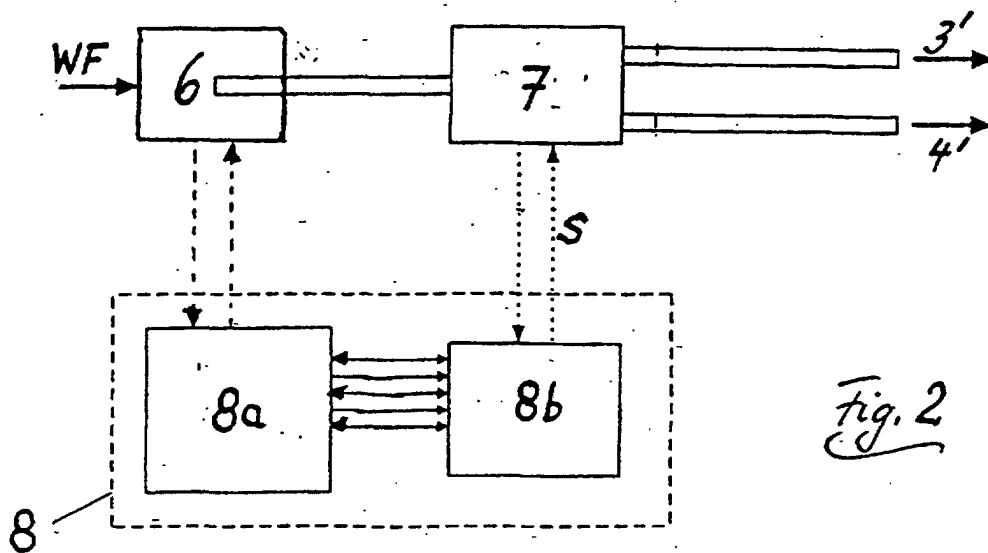
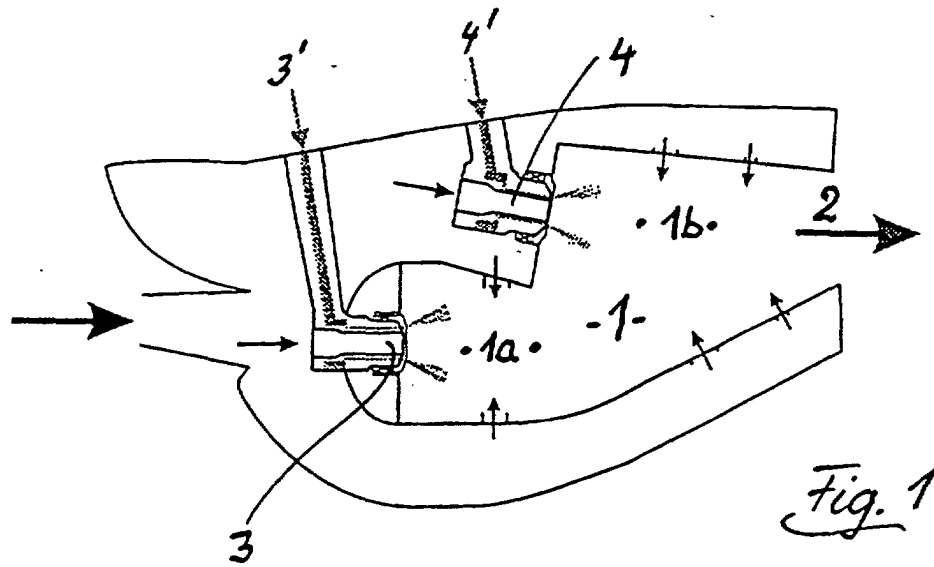
35

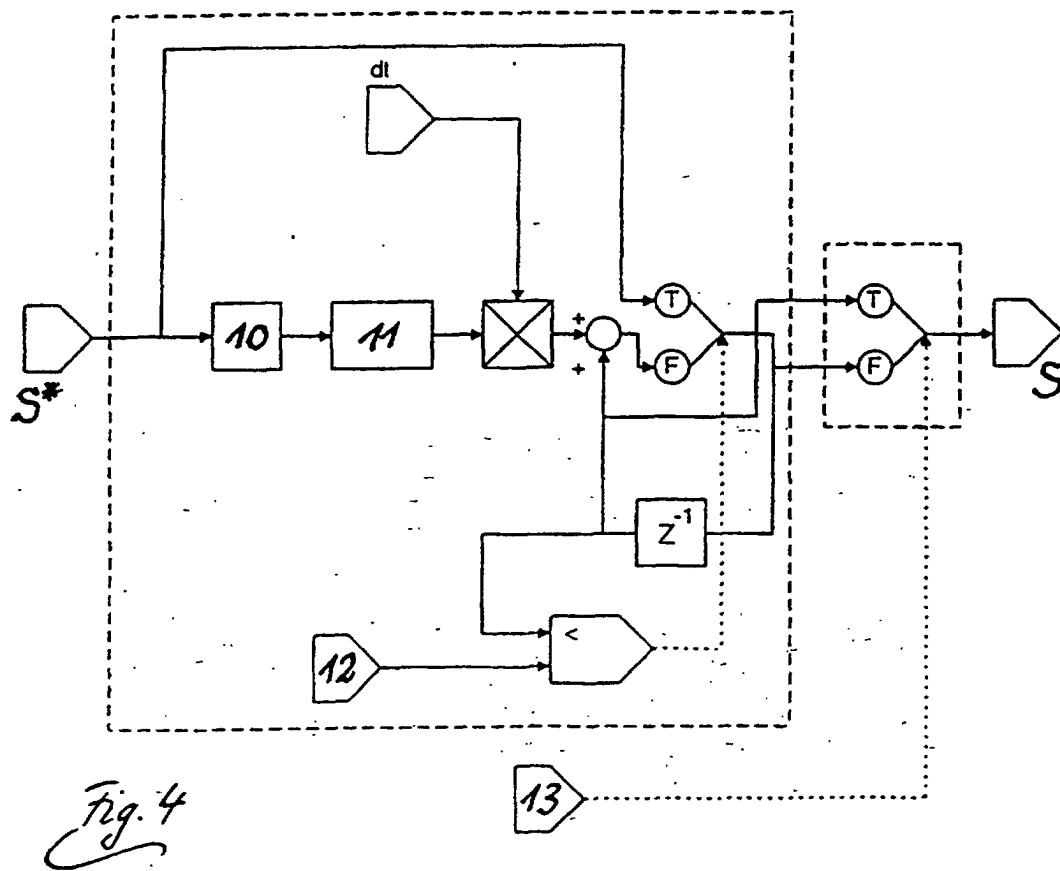
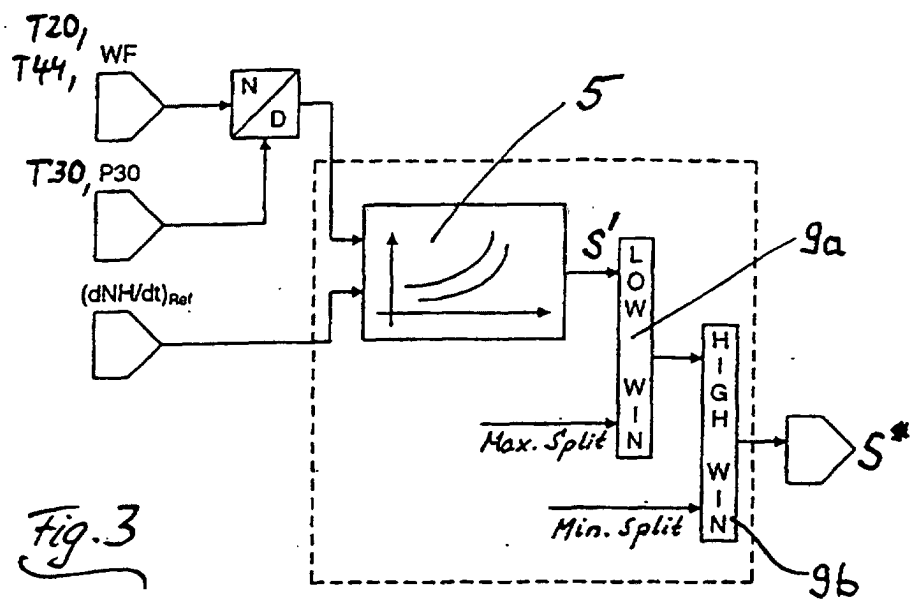
40

45

50

55





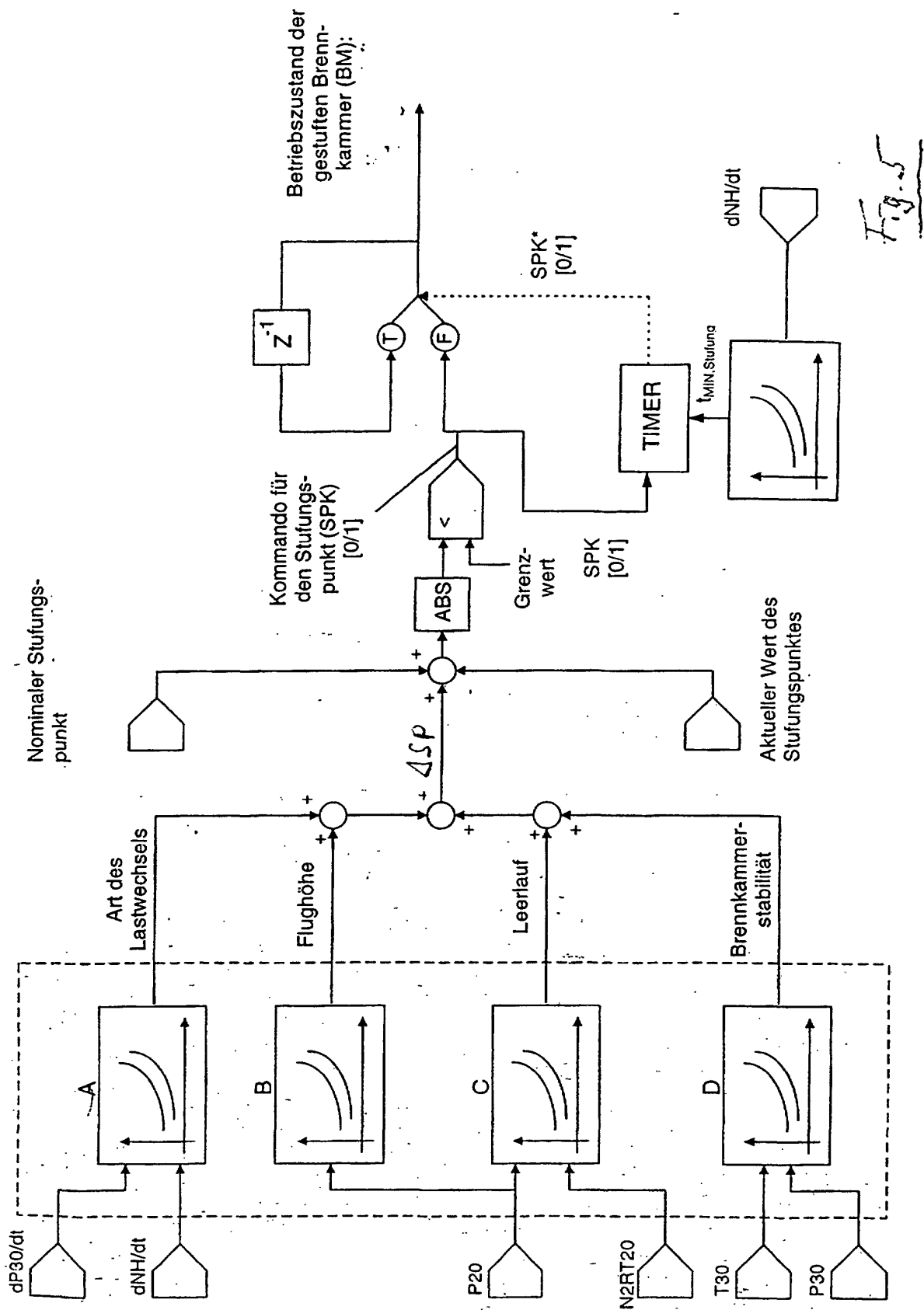


Fig. 5