



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 600 28 648 T2 2007.01.18

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) EP 1 045 204 B1

(51) Int Cl.⁸: F23R 3/06 (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: 600 28 648.7

(96) Europäisches Aktenzeichen: 00 303 179.6

(96) Europäischer Anmeldetag: 14.04.2000

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: 18.10.2000

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: 14.06.2006

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: 18.01.2007

(30) Unionspriorität:
292136 15.04.1999 US

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,
LI, LU, MC, NL, PT, SE

(73) Patentinhaber:
United Technologies Corp., Hartford, Conn., US

(72) Erfinder:
Hoke, James B., Tolland, Connecticut 06084, US;
Mountz, Daryl B., West Hartford, Connecticut
06110, US; Olsen, Howard, Wethersfield,
Connecticut 06109, US; Sonntag, Robert M.,
Manchester, Connecticut 06040, US

(74) Vertreter:
Klunker, Schmitt-Nilson, Hirsch, 80797 München

(54) Bezeichnung: **Brennkammer mit niedrigem Ausstoss für Gasturbinen**

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 eingelebt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Diese Erfindung betrifft einen Brenner für Gasturbinenmaschinen und insbesondere einen Brenner, der Stickoxide (NOx), Rauch und Emissionen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (unburned hydrocarbon – UHC) reduziert und der in einer Turbinenmaschine einfach anstelle eines existierenden Brenners älterer Generation ersetzt werden kann.

[0002] Flugzeuggasturbinenmaschinen unterliegen zunehmend strengen Umweltvorschriften, die Beschränkungen bei unerwünschten Abgasemissionen umfassen. Maschinen neuerer Generation sind dazu ausgelegt, existierenden und vorweggenommenen Vorschriften zu entsprechen. Maschinen älterer Generation wurden jedoch in einer Ära entworfen, als Umweltvorschriften weniger streng oder nicht existent waren. Diese Maschinen älterer Generation gelingt es nicht, vorauszusehenden Vorschriften zu entsprechen, und sie müssen evtl. aus dem Verkehr genommen werden, obwohl sie in jeder anderen Hinsicht gebrauchsfähig sind. Eine ansonsten gebrauchsfähige Maschine aus dem Verkehr zu ziehen, stellt für den Maschineneigner einen wesentlichen wirtschaftlichen Verlust dar.

[0003] Eine attraktive Alternative dazu, eine Maschine älterer Generation aus dem Verkehr zu ziehen, ist, ihre nutzbare Lebensdauer mit nachgerüsteten Bauteilen, die dazu ausgelegt sind, die Maschine regulativen Erfordernissen entsprechen zu lassen, zu verlängern. Zum Beispiel können Maschinenabgasemissionen reduziert werden durch Nachrüsten der Maschine mit neu entworfenen Brennkammern und Brennstoffspritzvorrichtungen. Die neu entworfenen Brennkammern und Einspritzvorrichtungen müssen die sich widersprechenden Erfordernisse erfüllen, Stickoxide (NOx) zu reduzieren, Rauch zu reduzieren, unverbrannte Kohlenwasserstoffe (UHC) zu reduzieren und Stabilität der Verbrennungsflamme zu gewährleisten. Außerdem sollte das Vorliegen von neu entworfenen Bauteilen die Maschinenleistung oder -funktionsfähigkeit nicht wesentlich verschlechtern oder die Haltbarkeit von Turbinen der Maschine gefährden.

[0004] Ein Ansatz für saubere Verbrennung wird als fette Verbrennung, schnelles Quenschen, magere Verbrennung (rich burn, quick quench, lean burn – RQL) bezeichnet. Die in vielen modernen Gasturbinenmaschinen verwendeten ringförmigen Brennern verwenden häufig das RQL-Verbrennungskonzept. Eine für RQL-Verbrennung ausgelegte Brennkammer hat eine Verkleidung, die drei seriell angeordnete Verbrennungszonen umgibt – eine Fett-Brenn-Zone, eine Quensch-Zone und eine Mager-Brenn-Zone. Die Fett-Brenn-Zone ist am vordersten Ende der Brennkammer und empfängt Brennstoff und Luft von Brennstoffspritzvorrichtungen, die in die Brennkammer ragen. Die Quensch-Zone ist direkt hinter der Fett-Brenn-Zone und weist einen Satz von Verdünnungslöchern auf, die die Verkleidung durchdringen, um Verdünnungsluft in die Brennkammer einzuführen. Die Mager-Brenn-Zone ist hinter der Quensch-Zone.

[0005] Während des Betriebs führen die Brennstoffspritzvorrichtungen kontinuierlich eine Luftmenge und eine stöchiometrisch zu große Brennstoffmenge in die Fett-Brenn-Zone zu. Das sich ergebende stöchiometrisch fette Brennstoff-Luft-Gemisch wird gezündet und verbrannt, um den Energiegehalt des Brennstoffs teilweise freizugeben. Der Brennstoff-reiche Charakter des Gemisches verhindert NOx-Bildung in der Fett-Brenn-Zone und widersteht einem Ausblasen der Brennflamme während einer abrupten Reduzierung der Maschinenleistung. Wenn das Gemisch jedoch übermäßig fett ist, erzeugt die Brennkammer unerwünschte Mengen an Rauch. Außerdem drückt das übermäßig fette Gemisch die Temperatur der Brennflamme, was die Erzeugung von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (UHC) unterstützen kann. Selbst wenn das Brennstoff-Luft-Gemisch in der Fett-Brenn-Zone im Durchschnitt weder übermäßig fett noch unzureichend fett ist, können räumliche Variationen beim Brennstoff-Luft-Verhältnis zu lokalen Bereichen führen, in denen das Gemisch zu fett ist, um Rauch und UHC-Emissionen zu mindern, und/oder unzureichend fett, um NOx-Emissionen zu mindern. Die Fähigkeit der Brennstoffspritzvorrichtung, ein ganz genau und gleichmäßig gemischtes Gemisch von Brennstoff und Luft zu der Brennkammer zu liefern, spielt somit eine wichtige Rolle beim Steuern von Abgasemissionen.

[0006] Die Brennstoff-reichen Verbrennungserzeugnisse, die in der Fett-Brenn-Zone erzeugt wurden, strömen in die Quensch-Zone, in der der Verbrennungsvorgang weitergeht. Strahlen von Verdünnungsluft werden quer in die Verbrennungskammer durch Quensch-Zone-Verdünnungslöcher eingebracht. Die Verdünnungsluft unterstützt weitere Verbrennung, um zusätzliche Energie von dem Brennstoff freizugeben, und hilft auch, Rauch zu konsumieren (durch Umwandeln des Rauchs in Kohlendioxid), der aus der Fett-Brenn-Zone stammen kann. Die Verdünnungsluft entreichert auch zunehmend die Brennstoff-reichen Verbrennungserzeugnisse, wenn sie durch die Quensch-Zone strömen und sich mit der Verdünnungsluft mischen. Anfänglich ändert sich das Brennstoff-Luft-Verhältnis der Verbrennungsprodukte von Brennstoff-reich zu annähernd stöchiometrisch, was einen begleitenden Anstieg bei der Brennflammentemperatur bewirkt. Da die in einem bestimmten

Zeitraum erzeugte Menge an NOx mit der Flammentemperatur exponentiell zunimmt, können erhebliche Mengen an NOx während des anfänglichen Quensch-Vorgangs erzeugt werden. Wenn das Quenschene fort dauert, ändert sich das Brennstoff-Luft-Gemisch der Verbrennungserzeugnisse von annähernd stöchiometrisch zu Brennstoff-arm, und die Flammentemperatur nimmt ab. Bis das Gemisch zu einem Brennstoff-Luft-Verhältnis verdünnt ist, das wesentlich geringer als stöchiometrisch ist, bleibt die Flammentemperatur jedoch hoch, und es bilden sich weiterhin beträchtliche Mengen an NOx. Demgemäß ist es wichtig für den Quensch-Vorgang, schnell voranzuschreiten, um die für die NOx-Bildung zur Verfügung stehende Zeitdauer, die hauptsächlich auftritt, während das Gemisch bei oder nahe seinem stöchiometrischen Brennstoff-Luft-Verhältnis ist, zu begrenzen.

[0007] Die entreicherten Verbrennungserzeugnisse aus der Quensch-Zone strömen in die Mager-Brenn-Zone, in der der Verbrennungsvorgang endet. Zusätzliche Strahlen von Verdünnungsluft können quer in die Mager-Brenn-Zone eingebracht werden. Die zusätzliche Verdünnungsluft unterstützt eine fortwährende Verbrennung, um Energie aus dem Brennstoff freizugeben, und hilft, das räumliche Temperaturprofil der Verbrennungserzeugnisse zu regulieren.

[0008] Eine Brennkammer mit niedrigen Emissionen, die als Ersatz für eine existierende Brennkammer mit hohen Emissionen in einer Maschine älterer Generation gedacht ist, muss auch physikalisch und funktional mit der beherbergenden Maschine kompatibel sein. Offensichtlich muss die Ersatzbrennkammer in ihrer Größe angepasst sein, um in die Maschine zu passen, und sie sollte in der Lage sein, die existierenden Brennkammermontagestellen der Maschine zu verwenden. Ferner sollte die Ersatzbrennkammer die Leistung, die Funktionsfähigkeit und die Haltbarkeit der Maschine nicht verschlechtern. Demgemäß sollte die Menge und der Druckabfall von Verdünnungsluft, die in die Ersatzbrennkammer eingebracht wird, nicht die Menge und den Druckabfall von Verdünnungsluft, die in die existierende Brennkammer eingebracht wird, übersteigen. Ansonsten könnte sich die Arbeitslinie des Verdichters der Maschine verschieben, was den Verdichter anfällig für aerodynamischen Strömungsabriss macht. Außerdem würde das Einführen einer erhöhten Menge von Verdünnungsluft in die Brennkammer die Haltbarkeit der Turbinen der Maschine gefährden, indem die Menge von für die Turbinenkühlung zur Verfügung stehender Luft verringert wird. Schließlich sollte das räumliche Temperaturprofil von Verbrennungsgasen, die in die Turbine eintreten, durch die Anwesenheit der Ersatzbrennkammer unbeeinflusst sein. Eine Ähnlichkeit des Temperaturprofils ist wichtig, da das Design des Turbinenkühlsystems der Maschine, das nicht einfach geändert werden kann, von dem durch die existierende Brennkammer erzeugten Temperaturprofil abhängt. Jede Änderung in diesem Profil würde daher die Haltbarkeit der Turbine gefährden.

[0009] Die für die RQL-Brennkammer verwendeten Brennstoffspritzvorrichtungen können Hybrideinspritzvorrichtungen sein. Eine Hybrideinspritzvorrichtung weist eine zentrale Druckzerstäubungshauptbrennstoffdüse und eine Sekundär-Luftstoß-Einspritzvorrichtung, die die Hauptdüse umgibt, auf. Die Druckzerstäubungshauptdüse arbeitet bei allen Maschinenleistungseinstellungen einschließlich während des Maschinenstarts. Der Luftstoßbereich (air blast) der Einspritzvorrichtung ist während des Maschinenstarts und während des Betriebs bei geringer Leistung abgeschaltet, wird aber für Betrieb mit höherer Leistung eingeschaltet. Während des Betriebs bringt die Hauptdüse einen verwirbelten, konischen Sprühstrahl von Hochdruckprimärbrennstoff in die Brennkammer ein und beruht auf einem abrupten Druckgradienten über die Düsenausstoßöffnung, um den Primärbrennstoff zu zerstäuben. Der Luftstoßbereich der Einspritzvorrichtung bringt verwirbelte, zueinander ringförmige (co-annulare) Ströme von innerer Luft, Sekundärbrennstoff und äußerer Luft in die Brennkammer ein, wobei der Sekundärbrennstoffstrom radial zwischen den Luftströmen angeordnet ist. Die Scherwirkung zwischen dem Sekundärbrennstoffstrom und den co-annularen Luftströmen zerstäubt den Brennstoff.

[0010] Wie bereits angemerkt, ist die Fähigkeit der Brennstoffeinspritzvorrichtung, ein ganz genau und gleichmäßig gemischtes Gemisch von Brennstoff und Luft zu der Brennkammer zu liefern, zum Steuern von Abgasemissionen wichtig. Eine gewisse räumliche Ungleichmäßigkeit des Brennstoff-Luft-Verhältnisses kann jedoch vorteilhaft sein. Zum Beispiel kann es erwünscht sein, einen angereicherten Kern von vermischemtem Brennstoff und Luft nahe der Mittellinie der Einspritzvorrichtung zu haben, um gegen ein Ausblasen der Flamme während abrupten Reduzierungen bei der Maschinenleistung zu schützen. Ein übermäßig angereicherter Kern kann jedoch inakzeptable Rauchemissionen während Hochleistungsbetriebs erzeugen. Dies trifft besonders zu, wenn die Verdünnungsluftstrahlen, die in die Brennkammerverdünnungszone eingebracht werden, nicht in der Lage sind, in den angereicherten Kern einzudringen und den Rauch zu verbrauchen.

[0011] Eine Schwäche aller Typen von Turbinenmaschinen-Brennstoffeinspritzvorrichtungen ist ihre Anfälligkeit auf die Bildung von Kohlenstoff, einer Wasserstoff-Kohlenstoff-Ablagerung, die sich an den Einspritzvorrichtungsoberflächen ansammelt, wenn der durch die Einspritzvorrichtung strömende Brennstoff übermäßige

Hitze absorbiert. In einer Hybrideinspritzvorrichtung kann Kohlenstoff, der sich an der Spitze der Hauptdüse bildet, nahe ihrer Auslassöffnung, das konische Sprühmuster von aus der Öffnung austretendem Brennstoff verschlechtern, so dass der Brennstoff ungleichmäßig verteilt wird. Die ungleichmäßige Brennstoffverteilung kann zu einer wesentlichen räumlichen Variation bei dem Brennstoff-Luft-Verhältnis führen, was es schwierig macht, NOx-Emissionen zu kontrollieren, ohne übermäßige Rauch oder UHCs in der Brennkammer-Fett-Brenn-Zone zu erzeugen. In extremen Fällen können die Kohlenstoffablagerungen den Konuswinkel des Hauptbrennstoffsprühstrahls reduzieren, was die zuverlässige Zündung während des Maschinenstarts stören kann.

[0012] Kohlenstoff kann sich auch auf einigen Oberflächen des Luftstoßbereiches der Einspritzvorrichtung bilden, insbesondere denjenigen Oberflächen, die der Brennkammer am nächsten sind. Diese Ablagerungen können, ähnlich wie diejenigen, die sich an der Spitze der Hauptdüse bilden, die gleichmäßige Verteilung des ringförmigen Brennstoff-Luft-Stroms stören. Außerdem können diese Ablagerungen während des Maschinenbetriebs von der Einspritzvorrichtung wegbrechen und Schaden an anderen Maschinenbauteilen bewirken.

[0013] Aus dem vorangehend Gesagten ist ersichtlich, dass die Strategie zum Minimieren der NOx-Erzeugung und Gewährleisten eines Widerstands gegen ein Ausblasen der Flamme (fett, Verbrennen bei niedriger Temperatur) in Konflikt steht mit der Strategie zum Mindern von Rauch und UHCs (magerer, Verbrennen bei höherer Temperatur). Es ist auch ersichtlich, dass die in Widerspruch stehenden Anforderungen einfacher abzugleichen sind, wenn die Brennstoffeinspritzvorrichtungen ein gleichmäßiges und genau gemischtes Brennstoff-Luft-Gemisch zu der Brennkammer liefern. Ein angereicherter Kern von Brennstoff und Luft nahe der Mittellinie der Einspritzvorrichtung ist jedoch wünschenswert, um gegen ein Ausblasen der Flamme während eines abrupten Maschinenleistungsübergangs zu schützen. Es ist auch ersichtlich, dass ein schneller Übergang von einer Brennstoff-reichen Stöchiometrie zu einer Brennstoff-armen Stöchiometrie höchst wünschenswert ist zum Vermeiden von NOx-Bildung. Schließlich ist es auch klar wünschenswert, dass die Leistung oder Haltbarkeit der Maschine durch das Vorhandensein der Ersatzhardware nicht beeinflusst wird.

[0014] Es ist daher eine prinzipielle Aufgabe der Erfindung, zumindest in ihren bevorzugten Ausführungsformen, eine Brennkammer bereitzustellen, die gleichzeitig die NOx-, UHC- und Rauchemissionen einer Gasturbinemaschine älterer Generation reduziert.

[0015] Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung zumindest in ihren bevorzugten Ausführungsformen, Emissionsreduzierungen zu vereinfachen mit einer Brennstoffeinspritzvorrichtung, die einer Kohlenstoffbildung widersteht und eine gut gemischte Mischung aus Brennstoff und Luft einführt, ohne die Zuverlässigkeit der Maschinenzündung zu gefährden.

[0016] Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung zumindest in ihren bevorzugten Ausführungsformen, eine Ersatzbrennkammer für eine Turbinemaschine bereitzustellen, ohne die Leistung und Haltbarkeit der Maschine nachteilig zu beeinflussen.

[0017] Beispiele von herkömmlichen Brennkammern sind in US 3 229 464, US 3 433 015 und GB 925 633 offenbart.

[0018] Gemäß einem Aspekt der Erfindung ist eine Brennerrohr vorgesehen, wie es in Anspruch 1 beansprucht ist.

[0019] In einer bevorzugten Ausführungsform weist somit ein Brennerrohr für eine Gasturbinemaschine eine Mehrzahl von Verdünnungsluflöchern auf, die gezielt positioniert in ihrer Größe angepasst und verteilt sind, um NOx, Rauch und UHCs zu reduzieren, wobei die Leistung und Haltbarkeit eines Brennerrohrs älterer Generation mit höheren Emissionen erreicht wird. In einer besonderen Ausführungsform kann das erfindungsähnliche Brennerrohr drei Gruppierungen von Verdünnungslöchern haben – eine erste Gruppierung, die die Brennerverkleidung etwa auf halbem Weg entlang der Länge der Verkleidung durchdringt, eine zweite Gruppierung in einem vorbestimmten Abstand hinter der ersten Gruppierung und umfangsmäßig mit dieser ausgerichtet und eine dritte Gruppierung bei einem vordefinierten Abstand hinter der dritten Gruppierung. Die Löcher der dritten Gruppierung sind in ihrer Größe angepasst und umfangsmäßig verteilt, um das räumliche Temperaturprofil der Verbrennungsgase, die das Brennerrohr verlassen, zu regulieren.

[0020] Der prinzipielle Vorteil der Erfindung ist ihre Fähigkeit, gleichzeitig Emissionen von NOx, UHC und Rauch zu reduzieren, ohne die Verbrennungsflamme für ein Ausblasen empfindlich zu machen.

[0021] Ein weiterer Vorteil der Erfindung ist ihre Kompatibilität mit einer Maschine älterer Generation, so dass die Maschine einfach und kostengünstig nachgerüstet werden kann, um strenge Emissionsstandards zu erfüllen.

[0022] Eine bevorzugte Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird nun lediglich beispielhaft unter Bezugnahme auf die begleitenden Zeichnungen beschrieben, wobei:

[0023] [Fig. 1](#) eine Querschnittsansicht eines Brennermoduls der vorliegenden Erfindung ist, die einen ringförmigen Druckbehälter, ein charakteristisches mit Lamellen versehenes Brennerrohr und eine charakteristische Brennstoffeinspritzvorrichtung zeigt.

[0024] [Fig. 1A](#) eine vergrößerte Ansicht des Brennerrohrs aus [Fig. 1](#) ist.

[0025] [Fig. 1B](#) eine detailliertere Ansicht der in [Fig. 1](#) sichtbaren Brennerrohrlamellen ist.

[0026] [Fig. 1C](#) eine schematische Ansicht ist, die ein vorbeschriebenes räumliches Temperaturprofil von Verbrennungserzeugnissen, die das Brennerrohr aus [Fig. 1](#) verlassen, zeigt.

[0027] [Fig. 2](#), [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) Ansichten sind, die in der Richtung 2-2, 3-3 und 4-4 aus [Fig. 1A](#) aufgenommen sind und die die umfangsmäßige Verteilung und Größe von Verdünnungsluftlöchern zeigen, die das Brennerrohr durchdringen.

[0028] [Fig. 5](#) eine Querschnittsseitenansicht ist, die innere Eigenschaften der Brennstoffeinspritzvorrichtung aus [Fig. 1](#) veranschaulicht.

[0029] [Fig. 5A](#) eine Querschnittsseitenansicht ist, die die Brennstoff- und Luft-Strömung durch die Brennstoffeinspritzvorrichtung aus [Fig. 1](#) veranschaulicht.

[0030] [Fig. 6](#) ein Graph ist, der die Arbeitsweise des Brenners als Ausdruck der Flammentemperatur und des Brennstoff-Verhältnisses darstellt.

[0031] [Fig. 7](#) eine schematische Veranschaulichung eines Verdünnungsluftstrahls ist, der in ein Brennerrohr durch ein charakteristisches Verdünnungsloch eindringt.

[0032] [Fig. 1](#), [Fig. 1A](#) und [Fig. 1B](#) veranschaulichen ein Brennermodul **10** für eine Flugzeuggasturbinenmaschine. Das Modul weist einen ringförmigen Druckbehälter auf, der durch ein inneres und ein äußeres Gehäuse **12**, **14** definiert ist, die um eine sich axial erstreckende Modulmittellinie **16** angeordnet sind. Das Modul weist auch neun Brennkammeranordnungen auf, die gleichwinklig um den Druckbehälter herum angeordnet sind. Die Verwendung mehrerer Brennkammeranordnungen ist typisch für Gasturbinenmaschinen älterer Generation; Maschinen neuerer Generation verwenden gewöhnlich eine ringförmige Brennkammer. Jede Brennkammeranordnung weist ein Brennerrohr **18** (combuster can) und eine Brennstoffeinspritzvorrichtung **20**, die in das Brennerrohr ragt, auf. In dem fertigen Brennermodul sind die Rohre und ihre zugeordneten Brennstoffeinspritzvorrichtungen an dem äußeren Gehäuse **14** befestigt. Der ringförmige Übergangskanal **22** erstreckt sich von den Brennerrohren, um heiße Verbrennungsgase in ein Turbinenmodul, das nicht gezeigt ist, zu kanalisieren.

[0033] Jedes Brennerrohr hat eine Rohrverkleidung **24**, die um eine sich axial erstreckende Verkleidungsmittellinie **28** angeordnet ist. Die Verkleidung besteht aus elf axial benachbarten, sich überlappenden Lamellen **L₁** bis **L₁₁**, die jede einen kreisförmigen Querschnitt haben, wie in den [Fig. 2](#), [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) zu sehen. Kühlluftlöcher **30** ([Fig. 1B](#)) perforieren die Lamellen, um einen Film von kühler Luft entlang der Innenoberfläche des Rohrs zu leiten. Zwei der neun Rohre weisen ein Zündungsansatzstück **32** auf, das eine Zündkerze (nicht gezeigt) aufnimmt, und alle neun Rohre weisen Durchzündöffnungen **34** (crossfire openings) auf, um eine Flamme umfangsmäßig während des Maschinenstarts von Rohr zu Rohr weiterzuleiten.

[0034] Jedes Rohr hat ein radial inneres Extremum **36**, das durch den innersten Schnitt zwischen der Verkleidung **24** und einer imaginären Ebene, die die Rohrmittellinie und die Modulmittellinie enthält, wenn das Rohr in dem durch die Gehäuse **12**, **14** definierten ringförmigen Druckbehälter installiert ist. Ein radial äußeres Extremum **38** des Rohrs ist in ähnlicher Weise definiert durch den äußersten Schnitt zwischen der Verkleidung und der imaginären Ebene. Jedes Rohr hat auch ein vorderes Ende, durch das sich ein Brennstoffeinspritzvorrichtungsanschluss **40** erstreckt. Der Anschluss ist radial durch eine Brennstoffeinspritzvorrichtungsführung **42** begrenzt, deren hintere Kante **46** eine Ausstoßöffnung definiert. Jedes Rohr hat auch ein hinteres Ende, das

an einer Verkleidungsrückkante endet, die der hinteren Kante **48** der elften Lamelle entspricht. Die Verkleidung hat eine effektive axiale Länge L von etwa 42,9 cm (16,9 inch) von der Einspritzvorrichtungsführungshinterkante bis zur Hinterkante **48** der elften Lamelle. Die Verkleidung umgibt eine Brennzone **50**, in der ein Brennstoff-Luft-Gemisch gezündet und verbrannt wird.

[0035] Zusätzlich Bezug nehmend auf die [Fig. 2](#), [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) durchdringen eine erste, eine zweite und eine dritte Gruppierung von Verdünnungsluftlöchern **52**, **54**, **56** die Verkleidung an ausgewählten Teilbereichen der effektiven axialen Länge L , um Strahlen von Verdünnungsluft in die Verbrennungszone **50** einzulassen. Die Menge und Größen der Verdünnungslöcher sind so gewählt, dass der Druckabfall über die Löcher und die Gesamtmenge von Verdünnungsluft, die in jedes Brennerrohr eingeführt wird, in etwa dem Druckabfall und dem Luftverbrauch eines existierenden Rohrs älterer Generation entspricht. Die Verdünnungslöcher sind gezielt positioniert, um Abgasemissionen zu kontrollieren und das räumliche Temperaturprofil der aus dem hinteren Ende jedes Rohrs austretenden Abgase zu regulieren. Im Rahmen dieser Beschreibung ist die Position eines Verdünnungslochs die Position seines Zentrums C , und die axiale Position eines Lochs wird ausgedrückt als ein Bruchteil oder Prozentanteil der effektiven axialen Länge L . Die Verdünnungslöcher unterteilen die Verbrennungszone in eine Fett-Brenn-Zone RB (rich burn zone), die sich von der Einspritzvorrichtungsführungshinterkante **46** zu der Vorderkante der ersten Löcher **52** erstreckt, eine Quensch-Zone Q, die axial coextensiv mit der ersten und der zweiten Lochgruppierung **52**, **54** sind, und eine Mager-Brenn-Zone LB (lean burn zone), die sich von der hinteren Kante der zweiten Löcher **54** zu der hinteren Kante des Rohrs erstreckt.

[0036] Die erste, am weitesten stromaufwärts angeordnete Gruppierung **52** von Verdünnungslöchern durchdringt die Verkleidung bei einer gemeinsamen axialen Position etwa in der Mitte entlang der effektiven axialen Länge L der Verkleidung. Bei dem veranschaulichten Brenner durchdringen die Löcher die Verkleidung bei einem Längenbruchteil von etwa 0,458 oder 45,8%, was der sechsten Lamelle L_6 entspricht. Die Lochmenge und Lochgröße sind so gewählt, dass die Verdünnungsluftstrahlen im Wesentlichen zu der Verkleidungsmittellinie **28** durchdringen. Bei dem veranschaulichten Brennerrohr hat die Lamelle L_6 etwa 17,8 cm (7,0 inch) Durchmesser, und die erste Lochgruppierung weist zwölf kreisförmige Löcher auf, die einen gemeinsamen ersten Durchmesser von etwa 16,26 mm (0,640 inch) haben. Die zwölf Löcher sind gleichwinklig um den Umfang der Verkleidung verteilt, wobei ein Loch an dem äußeren Extremum **38** des Rohrs positioniert ist. Etwa 43% der zu der Verbrennungszone zugelassenen Verdünnungsluft dringt durch die erste Lochgruppierung ein.

[0037] Die zweite Gruppierung **54** von Verdünnungslöchern durchdringt die Verkleidung bei einer gemeinsamen axialen Position eine vorbestimmte Distanz $D_{1,2}$ hinter der ersten Anordnung. Bei dem veranschaulichten Brenner durchdringen die zweiten Löcher die Verkleidung bei einem Längenbruchteil von etwa 54% oder hinter der ersten Lochgruppierung um etwa 8,2% der effektiven axialen Länge L . Die axiale Position der zweiten Löcher platziert sie in die siebte Lamelle L_7 , d.h. eine Lamelle benachbart der durch die erste Lochgruppierung durchdrungenen Lamelle. Die Menge und Größe der zweiten Löcher braucht, im Gegensatz zu der Menge und Größe der ersten Löcher, nicht so ausgewählt zu werden, dass die Verdünnungsluftstrahlen im Wesentlichen zu der Verkleidungsmittellinie **28** durchdringen. Bei dem veranschaulichten Brennerrohr hat die Lamelle L_7 etwa 17,8 cm (7,0 inch) im Durchmesser, und die zweite Lochgruppierung weist zwölf kreisförmige Löcher auf, die jeweils einen gemeinsamen zweiten Durchmesser von etwa 10,8 mm (0,425 inch) haben. Die zwölf Löcher sind gleichwinklig um den Umfang der Verkleidung verteilt, wobei ein Loch an der äußeren Extremität **38** des Rohrs positioniert ist, so dass jedes zweite Loch umfangsmäßig mit einem Loch der ersten Gruppierung ausgerichtet ist. Etwa 22% der zu der Verbrennungszone zugelassenen Verdünnungsluft dringt durch die zweite Lochgruppierung ein.

[0038] Die dritte, am weitesten stromabwärts angeordnete Gruppierung **56** von Verdünnungslöchern durchdringt die Verkleidung an einer gemeinsamen axialen Position eine definierte Distanz $D_{1,3}$ hinter der ersten Gruppierung. Die vordefinierte Distanz $D_{1,3}$ ist größer als die vorbestimmte Distanz $D_{1,2}$, so dass die dritte Lochgruppierung axial fern der ersten und der zweiten Lochgruppierung ist. Bei dem veranschaulichten Brenner durchdringen die dritten Löcher die Verkleidung bei einem Längenbruchteil von etwa 84,3%. Die axiale Position der dritten Löcher platziert sie in der zehnten Lamelle L_{10} , d.h. einer Lamelle axial nicht benachbart der Lamelle, die von der zweiten Lochgruppierung durchdrungen wird.

[0039] Die Größe und umfangsmäßige Verteilung der dritten Löcher sind so gewählt, dass der Verbrenngasstrom, der aus dem hinteren Ende des Rohrs austritt, ein radiales Temperaturprofil aufweist, das einem vorbeschriebenen Profil annähernd entspricht. Das vorbeschriebene Profil kann eines sein, das das Profil nachbildet, das einem Brennerrohr älterer Generation mit höheren Emissionen zugeordnet werden kann. Wenn dies so ist, kann das erfindungsgemäße Brennerrohr verwendet werden, um das Brennerrohr älterer Generation zu ersetzen, ohne die am vordersten angeordneten Bauteile des Turbinenmoduls einem Temperaturprofil auszu-

setzen, dem Stand zu halten diese Bauteile nicht ausgelegt sind. Wie schematisch in [Fig. 1C](#) gezeigt, ist ein solches Profil radial nicht gleichmäßig, wobei es nahe der Verkleidungsmittellinie **28** relativ heißer ist und nahe der Verkleidung selbst relativ kühler ist. Bei dem veranschaulichten Brennerrohr hat die Lamelle L_{10} einen Durchmesser von etwa 15,5 cm (6,1 inches), und die dritte Lochgruppierung weist zehn kreisförmige Löcher mit nicht-gleichmäßigen dritten Durchmessern auf. Die Löcher der dritten Gruppierung sind nicht gleichwinklig um den Umfang der Verkleidung verteilt. Bei dem veranschaulichten Brennerrohr ist ein Loch am äußeren Extremum **38** des Rohrs positioniert, und die anderen neun Löcher sind nicht-gleichwinklig von dem ersten Loch um einen spezifizierten Winkelversatz angeordnet. Die Lochdurchmesser und Lochversätze (in der Uhrzeigerichtung gesehen von einem Beobachter, der vom hinteren Ende der Verkleidung hin zum vorderen Ende der Verkleidung sieht) sind wie folgt spezifiziert:

<u>Loch</u>	<u>Winkelversatz</u>	<u>Durchmesser mm (inches)</u>
1.	0°	10,16 (0,400)
2.	10°	3,81 (0,150)
3.	48°	21,97 (0,865)
4.	108°	20,07 (0,790)
5.	144°	6,35 (0,250)
6.	180°	17,27 (0,680)
7.	216°	6,35 (0,250)
8.	252°	21,08 (0,830)
9.	312°	24,51 (0,965)
10.	350°	5,84 (0,230)

[0040] Etwa 35% der Verdünnungsluft, die zu der Brennkammerzone zugelassen wird, dringt durch die dritte Lochgruppierung ein.

[0041] Es wird nun Bezug genommen auf die [Fig. 5](#) und [Fig. 5A](#). Die Brennstoffeinspritzvorrichtung **20** weist eine Einspritzvorrichtungshalterung **60** zum Befestigen der Einspritzvorrichtung an dem äußeren Gehäuse **14** des Brennermoduls auf. Eine Primär- und eine Sekundär-Brennstoffversorgungsleitung **62**, **64** verlaufen durch die Halterung, um Brennstoff zu der Einspritzvorrichtung zuzuführen. Eine Druckzerstäubungskerndüse **66**, die um eine Brennstoffeinspritzvorrichtungsmittellinie **68** angeordnet ist, erstreckt sich axial durch eine Bohrung in der Halterung. Die Kerndüse weist eine Trommel **70** auf, die einen Primärbrennstoffdurchgang **72** hat, der über die Primärbrennstoffversorgungsleitung in Verbindung mit einer Quelle von Primärbrennstoff ist. Die Kerndüse weist auch ein Drallelement **76** auf, das an dem hinteren Ende der Trommel befestigt ist. Das Drallelement weist einen Spiraldurchgang **78** und eine Primärbrennstoffauslassdüse **80** auf. Eine Hitzeschildkappe **82** deckt das hintere Ende der Kerndüse ab, um Wärmeübertragung in den Primärbrennstoffdurchgang zu verlangsamen. Während des Betriebs strömt ein Hochdruckstrom von Primärbrennstoff F_p durch den Primärbrennstoffdurchgang und in den Drallerzeuger, der eine Verwirbelung des Primärbrennstoffstroms bewirkt. Der verwirbelte Primärbrennstoffstrom entweicht dann durch die Auslassdüse **80** und dringt in die Verbrennungszone des Brennermoduls ein.

[0042] Die Einspritzvorrichtung weist auch eine erste und eine zweite Unterteilung auf, die die Kerndüse umgeben. Die erste Unterteilung ist eine innere Hülse **84**, deren hinteres Ende eine sich verjüngende Oberfläche **86** ist. Die innere Hülse wirkt mit Bereichen reduzierten Durchmessers der Kerndüse zusammen, um Lufträume **88** zu definieren, die unerwünschte Wärmeübertragung in den Primärbrennstoffstrom F_p hemmen. Die zweite Unterteilung ist eine Zwischenhülse **92** mit einer sich verjüngenden Oberfläche **94** an ihrem hinteren Ende und einer radial nach außen abragenden Abschottung **96**. Die Zwischenhülse wirkt mit der ersten Unterteilung oder der inneren Hülse **84** zusammen, um das radial äußere und das radial innere Extremum eines im Wesentlichen axial orientierten ringförmigen inneren Luftdurchgangs **98** zu definieren, der einen inneren Luftstrom A_i axial durch die Einspritzvorrichtung führt. Ein Hitzeschildeinsatz **102**, der wie gezeigt ein zweiteiliger Einsatz **102a**, **102b** sein kann, verkleidet den inneren Umfang der Zwischenhülse **92**, um Wärmeübertragung von dem inneren Luftstrom auf den hierin im Anschluss beschriebenen zweiten Brennstoffdurchgang zu hemmen. Der Hitzeschildeinsatz erstreckt sich axial hin zu dem vorderen Ende der Einspritzvorrichtung und wirkt mit einem zylindrischen Bereich **104** der Brennstoffeinspritzvorrichtungshaltung zusammen, um einen Einlass **106** zu dem inneren Luftdurchgang zu definieren. Das vordere Ende des Hitzeschildeinsatzes divergiert weg von der Mittellinie **68**, so dass der Einlass **106** trichterförmig aufgeweitet ist und so viel Luft wie möglich ein-

fängt. Der innere Luftdurchgang weist ein inneres Drallrallelement auf, das eine Mehrzahl von inneren Dralllelementen **108** aufweist, die sich über den Durchgang erstrecken, um einen Drall auf den inneren Luftstrom zu bewirken. Der bewirkte Drall ist in die gleiche Richtung in Bezug auf den Drall des Primärbrennstoffstroms.

[0043] Die Einspritzvorrichtung weist auch eine dritte Unterteilung auf. Die dritte Unterteilung ist eine äußere Hülse **110** mit einer abgeschrägten Prallobenfläche **112**. Das hintere Ende der äußeren Hülse weist eine innere und eine äußere jeweils sich verjüngende Oberfläche **114, 116** auf. Die äußere Hülse umgibt die zweite Unterteilung oder die mittlere Hülse **92** und wirkt mit dieser zusammen, um einen Sekundärbrennstoffdurchgang zu definieren, der einen Strom von Sekundärbrennstoff F_s axial durch die Einspritzvorrichtung leitet. Der Sekundärbrennstoffdurchgang weist einen Schlitz **118** auf, der über die Sekundärbrennstoffleitung **64** in Verbindung mit einer Quelle von Sekundärbrennstoff ist. Der Sekundärbrennstoffdurchgang weist auch eine ringförmige Verteilungskammer **120** und ein Drallelement, das eine Mehrzahl von teilweise umfangsmäßig gerichteten Sekundärbrennstoffdüsen **122** hat, die die Abschottung **96** in der mittleren Hülse **92** durchdringen, auf. Der Sekundärbrennstoffdurchgang weist auch eine ringförmige Einspritzkammer **124** mit einem Auslass **126** auf. Aufgrund der sich verjüngenden Oberflächen **94, 114** an dem hinteren Ende der mittleren und der äußeren Hülse **92, 110** ist der Auslass so orientiert, dass aus dem Durchgang herausströmender Brennstoff hin zu der Mittellinie **68** der Einspritzvorrichtung gerichtet wird. Während des Betriebs strömt der Strom von Sekundärbrennstoff F_s durch den Sekundärdurchgang und durch die Sekundärbrennstoffdüsen, die einen Drall auf den Sekundärbrennstoffstrom bewirken. Der bewirkte Drall ist in der gleichen Richtung in Bezug auf den Drall des Primärbrennstoffs. Einzelne Strahlen aus von den Düsen ausgestoßenem Brennstoff treffen dann auf die Prallobenfläche **112**, die hilft, die einzelnen Strahlen wieder in einen umfangsmäßig kohärenten Brennstoffstrom zu vereinen. Der umfangsmäßig kohärente, verwirbelte Strom von Sekundärbrennstoff strömt dann aus dem Durchgangsauslass **126** heraus.

[0044] Die Einspritzvorrichtung weist auch ein äußeres Gehäuse **134** auf. Das äußere Gehäuse weist einen äußeren Wandbereich **136** auf, der die dritte Unterteilung oder die äußere Hülse **110** umgibt und die radial äußerste Begrenzung eines im Wesentlichen axial orientierten ringförmigen äußeren Luftdurchgangs **138** bildet. Der äußere Luftdurchgang leitet einen Strom von äußerer Luft A_o axial durch die Einspritzvorrichtung. Das hintere Extremum des Wandbereichs **136** weist eine interne, sich verjüngende Oberfläche **140**, die mit der externen, sich verjüngenden Oberfläche **116** der äußeren Hülse **110** zusammenwirkt, auf, um einen Auslass **142** des äußeren Durchgangs zu definieren. Aufgrund der zusammenwirkenden, sich verjüngenden Oberflächen **116, 140** ist der Auslass **142** so orientiert, dass der äußere Luftstrom hin zu der Einspritzvorrichtungsmittellinie **68** gerichtet ist. Das vordere Ende des äußeren Wandbereichs divergiert weg von der Mittellinie, so dass der Einlass **144** zu dem äußeren Luftdurchgang trichterförmig aufgeweitet ist und so viel Luft wie möglich einfängt. Das äußere Gehäuse **134** weist auch einen inneren Kragen **148** auf, der mit der dritten Unterteilung oder einer äußeren Hülse **110** zusammenwirkt, um einen Luftraum **150** zu definieren. Der Luftraum hemmt den Wärmeübergang von der äußeren Luft zu dem Sekundärbrennstoffstrom. Ein äußeres Luftdrallelement, wie z.B. eine Mehrzahl von äußeren Dralllelementen **152**, die sich über den äußeren Luftdurchgang erstrecken, bewirkt einen Drall auf die äußere Luft. Die Richtung des Dralls ist in der gleichen Richtung mit dem Drall, der auf den inneren Luftstrom durch die inneren Drallelemente **108** ausgeübt wird.

[0045] Die Einspritzvorrichtung weist auch ein Luftverteilungsablenkelement **154** mit einem Schaft **156** und einer Kappe **158** mit einem äußeren Rand **160** und einer sich verjüngenden hinteren Oberfläche **164** auf. Fenster (nicht gezeigt) durchdringen die konische Wand zwischen dem Schaft **156** und der Kappe **158**. Die Kappe erstreckt sich radial von dem Schaft über den inneren Luftdurchgang **98**, so dass der Kappenrand **160** radial von der mittleren Hülse **92** und dem Hitzeschildeinsatz **102**, der die mittlere Hülse verkleidet, beabstandet ist. Der Kappenrand und das Hitzeschildeinsatz definieren somit einen Luftein spritzring **166** nahe dem äußersten Umfang des inneren Luftdurchgangs. Die Kappe hat auch eine Mehrzahl von Luftein spritzdüsen **168**, die sich durch diese in einer im Wesentlichen axialen Richtung erstrecken. Während des Betriebs teilt das Ablenkelement den inneren Luftstrom in einen ringförmigen Teilstrom A_A , der durch den Luftein spritzring **166** strömt, und eine Mehrzahl von Luftstrahlen A_j auf, die aus den Einspritzdüsen **168** austreten. Der ringförmige Teilstrahl weist zwischen etwa 85% und 90% an Masse der inneren Luft A_i auf.

[0046] Ein oder mehrere der oben beschriebenen Brennerrohre und Brennstoffeinspritzvorrichtungen können die prinzipiellen Komponenten eines Nachrüstsatzes zum Reduzieren der Emissionen einer Gasturbinemaschine älterer Generation aufweisen.

[0047] Im Betrieb gabelt die Einspritzvorrichtung einen Quellenluftstrom in einen inneren und einen parallelen äußeren Strom A_i, A_o auf, die jeweils im Wesentlichen axial durch den inneren und den äußeren Luftdurchgang **98, 138** strömen. Die Drallelemente **108, 152** üben auf die Luftströme eine in die gleiche Richtung gerichtete

Verdrallung aus. Die Einspritzvorrichtung empfängt Primärbrennstoff durch die Primärbrennstoffleitung **62** und richtet einen Primärbrennstoffstrom F_p ein, der durch den Primärbrennstoffdurchgang **72** strömt, radial einwärts des inneren Luftstroms und im Wesentlichen parallel zu diesem. Das Drallelement **76** übt eine Verdrallung auf den Primärbrennstoff in einer Richtung aus, die rotationsmäßig gleich der Drallrichtung des Luftstroms ist. Die Einspritzvorrichtung empfängt auch Sekundärbrennstoff durch die Sekundärbrennstoffleitung **64** und richtet einen Sekundärbrennstoffstrom F_s ein, der durch den Sekundärbrennstoffdurchgang strömt, radial zwischen dem inneren und dem äußeren Luftstrom und im Wesentlichen parallel zu diesen. Die umfangsmäßig ausgerichteten Sekundärbrennstoffdüsen **122** üben eine Verdrallung auf den Sekundärbrennstoff in einer Richtung aus, die rotationsmäßig gleich der Drallrichtung der Luftströmung ist.

[0048] Das Ablenkelement **154** unterteilt den inneren Luftstrom A_i in einen ringförmigen Teilstrom A_A , radial beabstandet von dem Primärbrennstoffstrom, und eine Mehrzahl von Luftstrahlen A_j , die aus den Lufteinspritzdüsen radial zwischen dem ringförmigen Teilstrom und dem Primärbrennstoffstrom austreten. Die Einspritzvorrichtung führt die Brennstoffströme, den äußeren Luftstrom, den ringförmigen Teilstrom und die Mehrzahl von Luftstrahlen gleichzeitig in die Fett-Brenn-Zone des Brennerrohrs ein. Weil das Ablenkelement sich radial über den inneren Luftdurchgang erstreckt, bewirkt es einen Gegendruck auf den inneren Luftstrom, so dass die Luftstrahlen A_j aus den Düsen **168** mit einer hohen Geschwindigkeit austreten und zwangsläufig in den Primärbrennstoffstrom F_p eindringen, der aus der Primärbrennstoffauslassdüse **80** ausgestoßen wird. Als Ergebnis wird der Primärbrennstoff intensiv mit der aus den Düsen austretenden Luft vermischt, um zu helfen, die Erzeugung von NOx, UHCs und Rauch in der Fett-Brenn-Zone des Brennerrohrs zu begrenzen. Das Eindringen der Luftstrahlen hilft auch, lokale Zirkulation von Primärbrennstoffnebel in der Nähe der Primärdüsenspitze zu vermeiden und schützt daher gegen Kohlenstoffbildung an der Spitze. Das Eindringen der Luftstrahle hilft auch, eine Zone größeren Ausmaßes von rezirkulierender Luft und Sekundärbrennstoff zu unterbrechen, die sich ansonsten nahe der sich verjüngenden Oberfläche **164** ausbilden würde und Koksbildung an dieser Oberfläche unterstützen würde. Weil das Ablenkelement den größten Anteil der inneren Luft in den ringförmigen Teilstrom A_A , der radial von dem Primärbrennstoffstrom beabstandet ist, ablenkt, ist die Einspritzvorrichtung schließlich in der Lage, ein angereichertes Kerngemisch von Brennstoff und Luft nahe der Einspritzvorrichtungsmittellinie einzuführen, um gegen ein Ausblasen der Flamme während abrupter Maschinenleistungsreduzierungen zu schützen.

[0049] Der gleich-verdrallende Charakter der inneren und äußeren Luftströme unterstützt auch ein gutes Vermischen von Brennstoff und Luft und trägt daher zu reduzierten Abgasemissionen bei. Die Erfahrung hat gezeigt, dass ein Verdrallen von inneren und äußeren Luftströmen gegeneinander sich tendenziell gegenseitig aufhebt. Als Ergebnis dringt der Sekundärbrennstoffstrom in das Brennerrohr als ein relativ zusammenhängender ringförmiger Strahl von Brennstoff ein, der nicht leicht dispergiert. Die gleich-verdrallten Luftströme der beschriebenen Einspritzvorrichtung mischen sich jedoch leicht mit dem Sekundärbrennstoff, um ein gut gemischtes Gemisch zu ergeben, das sich in einem konischen Muster weg von der Einspritzvorrichtungsmittellinie verteilt.

[0050] Bezugnehmend nun auf die [Fig. 1](#), [Fig. 1A](#) und [Fig. 6](#) wird das gut vermischt, stöchiometrisch fette Gemisch aus Luft und Brennstoff, das durch die Brennstoffeinspritzvorrichtung in das Brennerrohr eingespritzt wurde, gezündet und in der Fett-Brenn-Zone verbrannt, um den Energiegehalt des Brennstoffs teilweise freizugeben. Weil das Brennstoffgemisch gut vermischt ist, sind sowohl die NOx- als auch die Raucherzeugung begrenzt. Das heißt, in dem gesamten Gemisch ist das Brennstoff-Luft-Verhältnis hoch genug (und die Flammentemperatur niedrig genug), um der NOx-Bildung zu widerstehen, und niedrig genug, um der Rauchbildung zu widerstehen ([Fig. 6](#)).

[0051] Die Brennstoff-reichen Verbrennungsprodukte aus der Fett-Brenn-Zone strömen dann in die Quensch-Zone, wo der Verbrennungsvorgang weitergeht. Die Verdünnungslöcher **52**, **54** lassen Strahlen von Verdünnungsluft quer in die Brennkammer ein. Die Verdünnungsluft mischt sich mit den Verbrennungsprodukten aus der Fett-Brenn-Zone, um weitere Verbrennung zu unterstützen, was die Flammentemperatur erhöht und zusätzlichen Energiegehalt des Brennstoffs freigibt. Die erste und die zweite Lochgruppierung **52**, **54** sind um einen wesentlichen Abstand axial hinter der Einspritzvorrichtungsführung **42** beabstandet. Ohne eine solche großzügige Beabstandung könnten der verwirbelte Brennstoff und die verwirbelte Luft, die aus der Brennstoffeinspritzvorrichtung ausgestoßen wurden, aerodynamisch mit den Verdünnungsluftstrahlen wechselwirken und einen Teil der Verdünnungsluft in die Fett-Brenn-Zone ziehen. Eine solche Wechselwirkung würde das Gemisch in der Fett-Brenn-Zone entreichern und erhöhte NOx-Emissionen und größere Anfälligkeit für ein Ausblasen der Flamme während abrupter Übergänge von hoher Maschinenleistung zu niedriger Leistung bewirken. Wenn jedoch die axiale Beabstandung zu großzügig ist, könnte eine übermäßige Menge der durch die Kühlluftlöcher **30** ([Fig. 1B](#)) eingeführten KühlLuft in das Brennstoff-Luft-Gemisch infiltrieren und die NOx-Erzeu-

gung in der Fett-Brenn-Zone erhöhen. Erfahrung zeigt, dass die erste Lochgruppierung **52** zwischen etwa 40% und 50% des Brennerlängenanteils positioniert sein kann.

[0052] Die Menge und Größe der ersten Löcher **52** sind so gewählt, dass die entsprechenden Verdünnungsstrahlen im Wesentlichen zu der Verkleidungsmittellinie **28** durchdringen. Wenn die Menge an Löchern zu groß ist, können die Verdünnungsstrahlen nicht zu der Verkleidungsmittellinie durchdringen. Als Ergebnis können Brennstoff-reiche Verbrennungsprodukte aus der Fett-Brenn-Zone durch die Quensch-Zone nahe der Mittellinie passieren, ohne mit der Verdünnungsluft gemischt zu werden. Es würde nicht nur der verbleibende Energiegehalt des Brennstoffs ungenutzt bleiben, sondern das Brennstoff-reiche Gemisch würde auch zu Rauchemissionen beitragen. Dies trifft insbesondere deshalb zu, da die Brennstoffeinspritzvorrichtung, wie zuvor beschrieben, dazu ausgelegt ist, ein ein wenig angereichertes Kerngemisch aus Brennstoff und Luft nahe der Verkleidungsmittellinie **28** einzuführen. Wenn andererseits die Menge von Löchern zu klein ist, wird die umfängliche Beabstandung S ([Fig. 2](#)) zwischen den Strahlen zu groß, um ein gutes Vermischen an Positionen radial entfernt von der Mittellinie zu gewährleisten. Eine übermäßige umfangsmäßige Beabstandung kann auch die Möglichkeit zum Kontakt zwischen den Brennstoff-reichen Verbrennungsprodukten und den Verdünnungsstrahlen reduzieren. Dies wiederum kann die Zeitdauer verlängern, die benötigt wird, um den Quensch-Vorgang abzuschließen, was, weil es die Flammtemperatur steigert, NOx-Bildung fördert. Da NOx-Bildung auch zeitabhängig ist, kann jede Verzögerung beim Quensch-Vorgang NOx-Emissionen verschlimmern.

[0053] Die zweite Gruppierung von Verdünnungslöchern **54** lässt zusätzliche Strahlen von Verdünnungsluft in die Quensch-Zone ein. Die zweite Lochgruppierung ist axial nahe der ersten Lochgruppierung und idealerweise so nahe wie möglich zu der ersten Lochgruppierung, um den Quensch-Vorgang so schnell wie möglich abzuschließen und dadurch NOx-Emissionen zu begrenzen. Als ein oberes Limit wird vorgeschlagen, dass die vorbestimmte Distanz $D_{1,2}$ nicht mehr als etwa 15% der effektiven axialen Länge L der Verkleidung ist oder etwa vier Mal der Durchmesser der ersten Löcher **52**, so dass die zweite Lochgruppierung der ersten Lochgruppierung axial nahe ist. Die Löcher der zweiten Gruppierung sind umfangsmäßig mit den Löchern der ersten Gruppierung ausgerichtet, um zu gewährleisten, dass die zweiten Strahlen von Verdünnungsluft sich mit Brennstoff-reichen Verbrennungsprodukten mischen, die in die relativ ruhige Region direkt hinter den ersten Strahlen transportiert werden. Von einem solchen Transport von Verbrennungsprodukten wird angenommen, dass er das Ergebnis von Wirbeln ([Fig. 7](#)) ist, die sich in dem Hauptverbrennungsgasstrom bilden, wenn der mit den hereinkommenden Verdünnungsstrahlen wechselwirkt.

[0054] Die Löcher der zweiten Lochgruppierung sind in ihrer Größe kleiner ausgelegt als die Löcher der ersten Gruppierung. Als Ergebnis durchdringt die Verdünnungsluft, die durch die zweite Lochgruppierung eingesenkt wird, nur einen Teil der radialen Distanz zu der Verkleidungsmittellinie. Ein vollständiges Durchdringen der zweiten Verdünnungsstrahlen ist unnötig, da die Menge an Verdünnungsluft, die zu der Nähe der Mittellinie durch die erste Lochgruppierung gelassen wird, ausreicht, um Rauchemissionen zu unterdrücken. Die begrenzte Eindringtiefe der zweiten Verdünnungsstrahlen steigert auch die Verkleidungskühlung, um zu helfen, die Verkleidung kühl zu halten. Es wird vorgeschlagen, dass die erste Lochgruppierung **52** etwa doppelt so viel Verdünnungsluft in die Verbrennungszone **50** lässt wie die zweite Lochgruppierung **54**.

[0055] Die stöchiometrisch mageren Verbrennungsprodukte aus der Quensch-Zone dringen dann in die Mager-Brenn-Zone ein, wo der Verbrennungsvorgang endet. Die dritte Verdünnungslochgruppierung **56** lässt zusätzliche Verdünnungsluft in die Mager-Brenn-Zone ein, um das räumliche Temperaturprofil der Verbrennungsprodukte, die das Brennerrohr verlassen, zu regulieren. Die dritte Lochgruppierung ist vor der Hinterkante der Verkleidung beabstandet, so dass die zusätzliche Verdünnungsluft ausreichend Zeit und Abstand hat, um sich mit den Verbrennungsprodukten zu mischen und ihr räumliches Temperaturprofil anzupassen. Wenn die dritte Lochgruppierung jedoch zu weit vor der Hinterkante **48** ist, kann ein übermäßiges Mischen auftreten, wodurch das Temperaturprofil gestört wird. Im Grenzfall wird vorgeschlagen, dass die vordefinierte Distanz $D_{1,3}$ von der ersten Lochgruppierung **52** zu der dritten Lochgruppierung **56** mindestens etwa 29% der effektiven axialen Länge der Verkleidung sein sollte oder etwa 7 1/2 Mal der Durchmesser der ersten Lochgruppierung.

[0056] Die Menge an Verdünnungsluft, die durch die drei Gruppierungen von Verdünnungslöchern eingelassen wird, und der Druckabfall der Verdünnungsluft sind in etwa gleich dem Luftverbrauch und dem Luftdruckabfall eines Brennerrohrs älterer Generation, das das erfundungsgemäß Rohr auslegungsgemäß ersetzen soll. Demgemäß beeinflusst das erfundungsgemäß Rohr die Leistung und die Funktionsfähigkeit der Maschine nicht und reduziert auch nicht die Menge an Luft, die für die Verwendung als Turbinenkühlmittel zur Verfügung steht.

[0057] Obwohl diese Erfindung unter Bezugnahme auf deren detaillierte Ausführungsform gezeigt und beschrieben wurde, wird von den mit dem Stand der Technik vertrauten Fachleuten verstanden, dass verschiedene Änderungen in der Form und in Einzelheiten ausgeführt werden können, ohne vom Umfang der Erfindung, wie er durch die begleitenden Ansprüche ausgeführt ist, abzuweichen.

Patentansprüche

1. Brennerrohr (**18**) für eine Turbinemaschine, aufweisend:
eine Verkleidung (**24**) mit einer Mittellinie (**28**), einem vorderen Ende mit einer sich durch dieses erstreckenden Brennstoffeinspritzvorrichtungsöffnung (**40**) und einem hinteren Ende, das an einer Hinterkante (**48**) endet, wobei die Verkleidung eine Verbrennungszone (**50**) umgibt und eine effektive axiale Länge (L) hat; und
eine erste Gruppierung (**52**) von Verdünnungslöchern, die die Verkleidung (**24**) durchdringen; und ferner aufweisend
eine zweite Gruppierung (**54**) von Verdünnungslöchern, die die Verkleidung (**24**) bei einer vorbestimmten Distanz ($D_{1,2}$) hinter der ersten Gruppierung (**52**) durchdringen, wobei jedes Loch der zweiten Lochgruppierung (**54**) im Wesentlichen umfangsmäßig mit einem Loch der ersten Lochgruppierung (**52**) ausgerichtet ist; und
eine dritte Gruppierung (**56**) von Verdünnungslöchern, die die Verkleidung (**24**) hinter der zweiten Gruppierung (**54**) und bei einer vordefinierten Distanz ($D_{1,3}$) hinter der ersten Gruppierung (**52**) durchdringen, wobei die Löcher der dritten Gruppierung umfangsmäßig so verteilt und in ihrer Größe angepasst sind, dass Verdünnungsluft in einer umfangsmäßig ungleichmäßigen Weise zu der Verbrennungszone gelassen wird.
2. Brennerrohr (**18**) nach Anspruch 1, wobei die Löcher der dritten Gruppierung umfangsmäßig ungleichmäßig verteilt und/oder in ihrer Größe ungleichmäßig sind.
3. Brennerrohr nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Löcher der ersten Verdünnungslochgruppierung (**52**) die Verkleidung (**24**) an einer gemeinsamen axialen Position zwischen etwa 40% und 50% der effektiven axialen Länge (L) der Verkleidung (**24**) durchdringen.
4. Brennerrohr nach Anspruch 1, 2 oder 3, wobei die vorbestimmte Distanz ($D_{1,2}$) nicht mehr als etwa 15% der effektiven axialen Länge L der Verkleidung (**24**) ist.
5. Brennerrohr nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die vordefinierte Distanz ($D_{1,3}$) mindestens etwa 29% der effektiven axialen Länge (L) der Verkleidung (**24**) ist.
6. Brennerrohr nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Menge und die Größe der Verdünnungslöcher der ersten Gruppierung (**52**) so gewählt sind, dass Luftstrahle, die durch die erste Lochgruppierung (**52**) zu der Verbrennungszone (**50**) gelassen werden, im Wesentlichen zu der Verkleidungsmittellinie (**28**) durchdringen.
7. Brennerrohr nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Menge und die Größe der Verdünnungslöcher der ersten (**52**) und der zweiten Gruppierung so gewählt sind, dass die erste Lochgruppierung (**52**) etwa doppelt so viel Verdünnungsluft in die Verbrennungszone (**50**) zulässt wie die zweite Lochgruppierung (**54**).
8. Brennerrohr nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Menge und die Größe der Verdünnungslöcher derart ist, dass die erste, die zweite und die dritte Lochgruppierung (**52, 54, 56**) etwa jeweils 43%, 22% und 35% der gesamten Menge von in die Verbrennungszone (**50**) gelassener Verdünnungsluft einlassen.
9. Brennerrohr nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Löcher der ersten Verdünnungslochgruppierung (**52**) kreisförmige Löcher mit einem gemeinsamen ersten Durchmesser sind, die Löcher der zweiten Verdünnungslochgruppierung (**54**) kreisförmige Löcher mit einem gemeinsamen zweiten Durchmesser sind und die vorbestimmte Distanz zwischen den Lochmittnen nicht mehr als etwa vier erste Durchmesser ist.
10. Brennerrohr nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Löcher der ersten Verdünnungslochgruppierung (**52**) kreisförmige Löcher mit einem gemeinsamen ersten Durchmesser sind, die Löcher der dritten Verdünnungslochgruppierung (**56**) kreisförmige Löcher sind und die vordefinierte Distanz zwischen den Lochmittnen mindestens etwa 7,5 erste Durchmesser ist.
11. Brennerrohr nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Löcher der ersten und der zweiten Lochgruppierung gleichwinklig um den Umfang des Rohrs verteilt sind.

12. Brennerrohr nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Löcher der ersten Lochgruppierung (52) kreisförmige Löcher mit einem gemeinsamen ersten Durchmesser sind, die Löcher der zweiten Lochgruppierung (54) kreisförmige Löcher mit einem gemeinsamen zweiten Durchmesser, der kleiner ist als der erste Durchmesser, sind und die Löcher der dritten Lochgruppierung kreisförmig sind.

13. Brennerrohr nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Größe und die umfangsmäßige Verteilung der Löcher der dritten Gruppierung (56) bewirken, dass ein Verbrennungsgasstrom, der aus dem hinteren Ende der Verkleidung (24) austritt, ein radial ungleichmäßiges Temperaturprofil aufweist.

14. Brennerrohr nach Anspruch 13, wobei das Temperaturprofil relativ heißer nahe der Verkleidungsmittellinie (26) und relativ kühler nahe der Verkleidung (24) ist.

15. Brennerrohr nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Verkleidung (24) einen Satz von Lamellen aufweist, wobei die erste und die zweite Lochgruppierung (52, 54) benachbarte Lamellen durchdringen und die dritte Lochgruppierung (56) eine Lamelle nicht-benachbart der durch die zweite Lochgruppierung (54) durchdrungenen Lamelle durchdringt.

16. Brennerrohr nach Anspruch 15, wobei die Verkleidung (24) einen Satz von elf axial benachbarten Lamellen (L_1 bis L_{11}) aufweist, wobei die erste Gruppierung (52) von Verdünnungslöchern die Sechste der elf Lamellen (L_6) durchdringt, die zweite Gruppierung (54) von Verdünnungslöchern die Siebte der elf Lamellen (L_7) durchdringt und die dritte Gruppierung (56) von Verdünnungslöchern die Zehnte der elf Lamellen (L_{10}) durchdringt.

17. Brennerrohr (18) nach Anspruch 2, wobei die Verkleidung (24) einen Satz von elf axial benachbarten Lamellen (L_1 bis L_{11}) hat, die um die Verkleidungsmittellinie (28) angeordnet sind; wobei die Brennstoffeinspritzvorrichtungsöffnung (40) radial begrenzt ist durch eine Brennstoffeinspritzvorrichtungsführung (42) mit einer Auslassöffnung (46), wobei das hintere Ende des Rohrs an dem hinteren Rand (48) der elften Lamelle (L_{11}) endet, wobei die Verkleidung eine Verbrennungszone (50) umgibt; wobei die erste Gruppierung (52) eine Gruppierung von gleichwinklig verteilten kreisförmigen Verdünnungslöchern ist, die jedes einen gemeinsamen ersten Durchmesser haben und die sechste Lamelle (L_6) durchdringen; wobei die zweite Gruppierung (54) eine Gruppierung von gleichwinklig verteilten kreisförmigen Verdünnungslöchern ist, die jedes einen gemeinsamen zweiten Durchmesser, kleiner als der erste Durchmesser, haben und die siebte Lamelle (L_7) durchdringen, wobei jedes Loch der zweiten Lochgruppierung (54) im Wesentlichen umfangsmäßig mit einem Loch der ersten Lochgruppierung (52) ausgerichtet ist; und wobei die dritte Gruppierung (56) eine Gruppierung von nicht-gleichwinklig verteilten kreisförmigen Verdünnungslöchern ist, die nicht-gleichmäßige dritte Durchmesser haben und die zehnte Lamelle (40) durchdringen.

18. Brennerrohr nach Anspruch 16 oder 17, wobei die sechste, die siebte und die zehnte Lamelle Durchmesser von jeweils etwa 17,8, 17,8, 15,5 cm (7,0, 7,0 und 6,1 inches) haben, wobei die Löcher der ersten Lochgruppierung einen Durchmesser von etwa 16,26 mm (0,640 inches) haben, die Löcher der zweiten Lochgruppierung einen Durchmesser von etwa 10,80 mm (0,425 inches) haben und die Löcher der dritten Lochgruppierung Durchmesser haben, die in Millimetern (Inches) wie unten spezifiziert ausgedrückt sind:

Loch	Durchmesser
1.	10,16 (0,400)
2.	3,81 (0,150)
3.	21,97 (0,865)
4.	20,07 (0,790)
5.	6,35 (0,250)
6.	17,27 (0,680)
7.	6,35 (0,250)
8.	21,08 (0,830)
9.	29,51 (0,965)
10.	5,84 (0,230)

19. Brennerrohr nach Anspruch 18, wobei die effektive Länge des Rohrs definiert von der Auslassöffnung (46) der Brennstoffeinspritzvorrichtungsführung (42) zu der Hinterkante (48) der elften Lamelle (L_{11}) etwa 42,9 cm (16,9 inches) ist.

20. Brennerrohr nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei das Rohr ein radial inneres und ein radial äußeres Extremum hat und wobei die erste und die zweite Lochgruppierung (**52, 54**) jeweils zwölf Löcher aufweisen, wobei ein Loch jeder Gruppierung an dem äußeren Extremum des Rohrs positioniert ist und wobei die dritte Lochgruppierung (**56**) zehn Löcher aufweist, die winkelmäßig wie unten spezifiziert verteilt sind:

Loch	Winkelversatz
1.	0°
2.	10°
3.	48°
4.	108°
5.	144°
6.	180°
7.	216°
8.	252°
9.	312°
10.	350°

wobei das erste Loch an dem äußeren Extremum des Rohrs ist und das zweite bis zehnte Loch im Uhrzeigersinn von dem ersten Loch um den spezifizierten Winkelversatz versetzt sind, gesehen von einem Beobachter, der von dem hinteren Ende der Verkleidung zu dem vorderen Ende der Verkleidung sieht.

21. Brennerrohr nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die erste Gruppierung (**52**) die am weitesten stromaufwärts angeordnete Gruppierung von Verdünnungslöchern ist und die dritte Gruppierung (**56**) die am weitesten stromabwärts angeordnete Gruppierung von Verdünnungslöchern ist.

22. Brennerrohr nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die erste, die zweite und die dritte Verdünnungslochgruppierung (**52, 54, 56**) die einzigen in dem Brennerrohr (**18**) vorhandenen Gruppierungen von Verdünnungsluftlöchern sind.

23. Brennkammeranordnung, aufweisend:

ein Brennerrohr gemäß einem der vorangehenden Ansprüche; und eine Brennstoffeinspritzvorrichtung, die in das Brennerrohr ragt.

24. Nachrüstsatz für ein Gasturbinenmaschinen-Brennermodul, aufweisend:

ein Brennerrohr gemäß einem der Ansprüche 1 bis 22; und eine Brennstoffeinspritzvorrichtung.

25. Brennermodul für eine Gasturbinenmaschine, aufweisend:

einen ringförmigen Druckbehälter, der durch ein äußeres und ein inneres Gehäuse (**12, 14**) definiert ist, die um eine sich axial erstreckende Modulmittellinie (**16**) angeordnet sind;

eine Mehrzahl von Brennerrohren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 23, wobei jedes Rohr ein inneres Extremum und ein äußeres Extremum hat, wobei die Rohre gleichwinklig innerhalb des Druckbehälterrings verteilt sind, so dass die inneren Extrema der Rohre von der Modulmittellinie gleich beabstandet sind, wobei jedes Rohr (**18**) an dem äußeren Gehäuse (**14**) befestigt ist; und

eine Mehrzahl von Brennstoffeinspritzvorrichtungen (**20**), die an dem äußeren Gehäuse befestigt sind und jede durch eine Brennstoffeinspritzvorrichtungsöffnung (**42**) ragen.

26. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 23 bis 25, wobei die Brennstoffeinspritzvorrichtung aufweist: eine Druckzerstäubungskerndüse (**66**), die um eine Einspritzvorrichtungsmittellinie (**68**) angeordnet ist, wobei die Kerndüse eine Auslassdüsenöffnung zum Injizieren eines Stroms von Primärbrennstoff (F_p) in eine Verbrennungszone (**50**) des Moduls hat;

eine erste und eine zweite Unterteilung (**84, 92**), die die Kerndüse (**66**) umgeben, um ein radial inneres und ein radial äußeres Extremum eines ringförmigen inneren Luftdurchgangs (**98**) zum Injizieren eines Stroms von innerer Luft A_i in die Verbrennungszone (**50**) zu definieren;

eine dritte Unterteilung (**110**), die die zweite Unterteilung (**92**) umgibt und mit dieser zusammenwirkt, um einen zweiten Brennstoffdurchgang zu definieren, der einen Auslass hat, der so orientiert ist, dass ein Strom von Sekundärbrennstoff F_p in die Verbrennungszone (**50**) hin zu der Einspritzvorrichtungsmittellinie gerichtet wird;

eine äußere Wand (**136**), die die dritte Unterteilung (**110**) umgibt und die radial äußerste Begrenzung eines ringförmigen äußeren Luftdurchgangs (**138**) bildet mit einem Auslass, der so orientiert ist, dass ein Strom von äußerer Luft in die Verbrennungszone hin zu der Einspritzvorrichtungsmittellinie gerichtet wird; und

ein Luftverteilungsablenkelement (**154**) mit einer Kappe (**158**) mit einer Mehrzahl von Luftinjektionsdüsenöff-

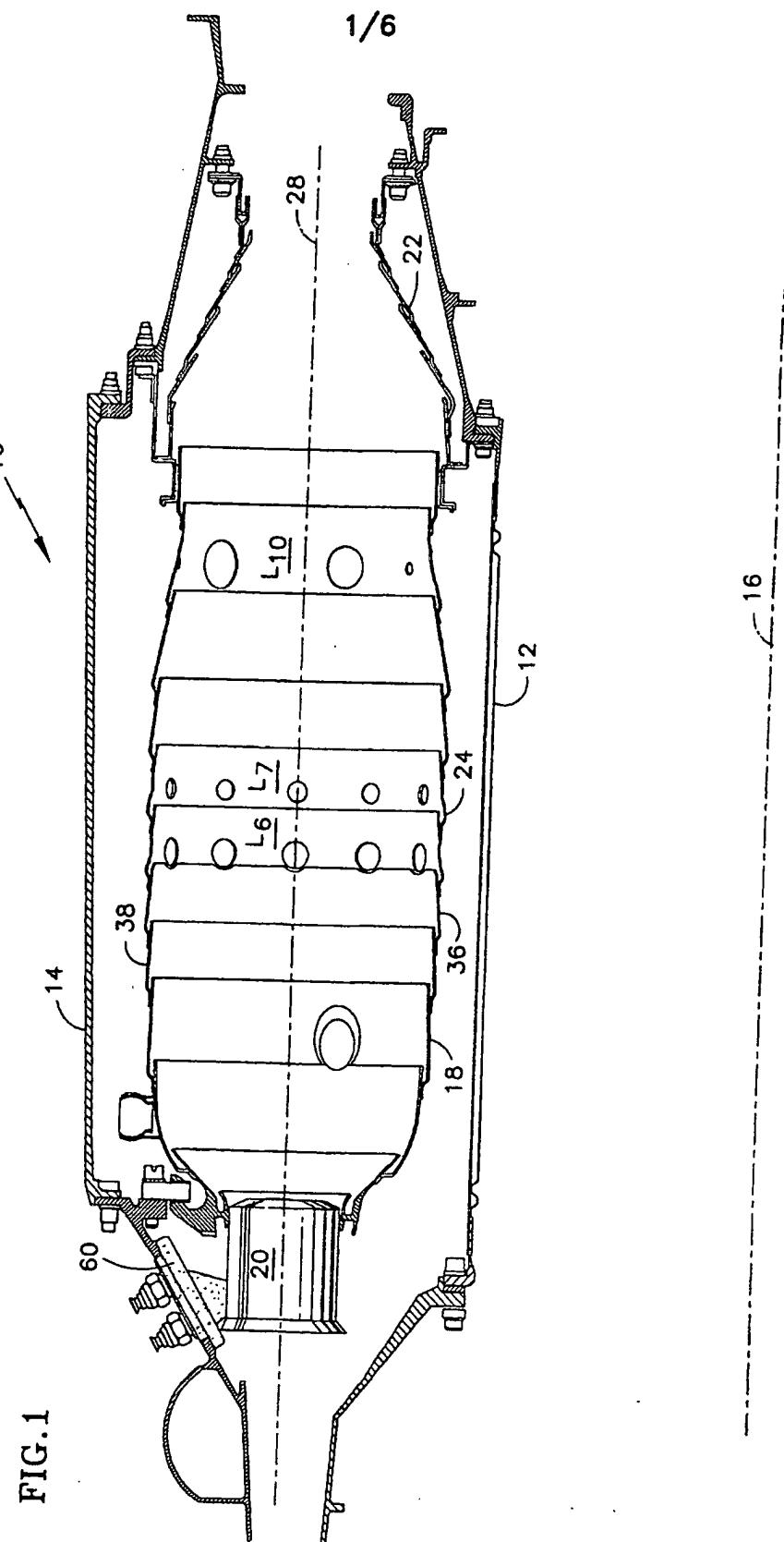
nungen (**168**), die sich durch diese hindurch erstrecken, wobei die Kappe (**158**) sich radial über den inneren Luftdurchgang erstreckt und einen äußeren Rand radial beabstandet von der zweiten Unterteilung (**92**) hat, um einen Luftinjektionsring (**166**) so zu definieren, dass die Kappe (**158**) den inneren Luftstrom in einen ringförmigen Teilstrom (A_A), der durch den Luftinjektionsring (**166**) strömt, und eine Mehrzahl von Luftstrahlen A_j , die aus den Luftinjektionsdüsenöffnungen (**168**) austreten, unterteilt.

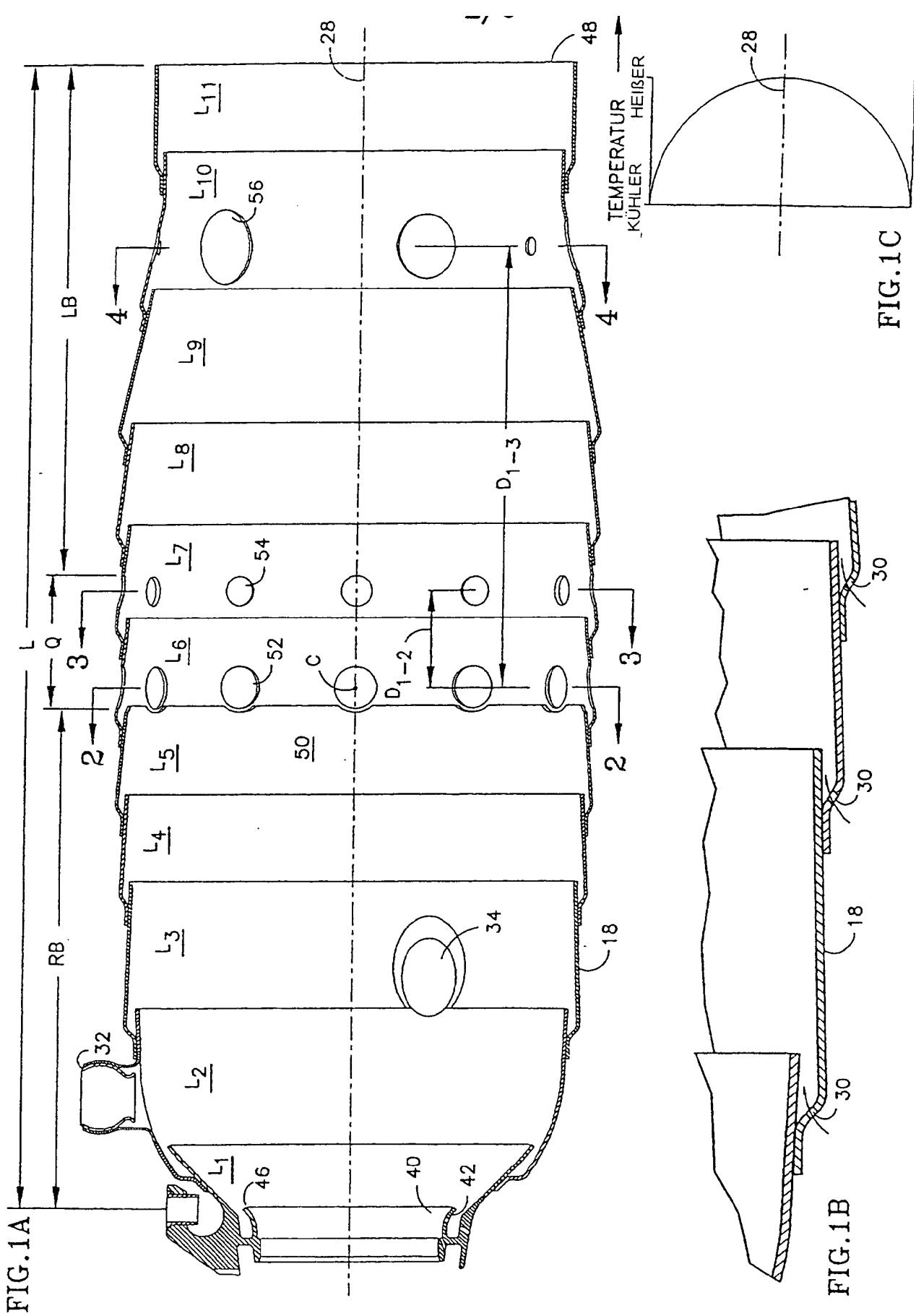
27. Verfahren zum Verbrennen von Brennstoff und Luft in einer Verbrennungszone, aufweisend:
Injizieren von Brennstoff und Luft in das vordere Ende der Verbrennungszone (**50**);
Zünden des Brennstoffs und der Luft, um einen Strom von Verbrennungsgasen zu erzeugen;
Einlassen einer Mehrzahl von ersten Strahlen von Verdünnungsluft in die Verbrennungszone derart, dass die ersten Strahlen sich zumindest teilweise mit dem Verbrennungsgasstrom vermischen, um einen teil-gequenschten Gasstrom zu erzeugen;
Einlassen einer Mehrzahl von zweiten Strahlen von Verdünnungsluft in die Verbrennungszone bei einer vorbestimmten Distanz hinter einem ersten Strahl und jeweils umfangsmäßig ausgerichtet mit einem entsprechenden ersten Strahl, so dass die zweiten Strahlen sich zumindest teilweise mit dem teil-gequenschten Gasstrom mischen, um einen im Wesentlich gequenschten Gasstrom zu erzeugen; und
Einlassen einer Mehrzahl von dritten Strahlen von Verdünnungsluft in die Verbrennungszone bei einer vorbestimmten Distanz hinter der ersten Mehrzahl von Strahlen in einer umfangsmäßig nicht-gleichmäßigen Weise.

28. Verfahren nach Anspruch 27, wobei die Verbrennungszone eine Mittellinie, eine effektive Länge, ein vorderes Ende und ein hinteres Ende hat; und wobei
die Mehrzahl von ersten Strahlen von Verdünnungsluft in die Verbrennungszone etwa mittig entlang der effektiven axialen Länge der Verbrennungszone so eingelassen wird, dass die ersten Strahlen sich zumindest teilweise mit dem Verbrennungsgasstrom mischen, um einen semi-gequenschten Gasstrom zu erzeugen; und
jeder dritte Strahl eine Größe entsprechend der Menge von durch den Strahl eingelassener Luft hat, wobei die dritten Strahlen umfangsmäßig unregelmäßig verteilt sind und/oder eine unregelmäßige Größe haben.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen





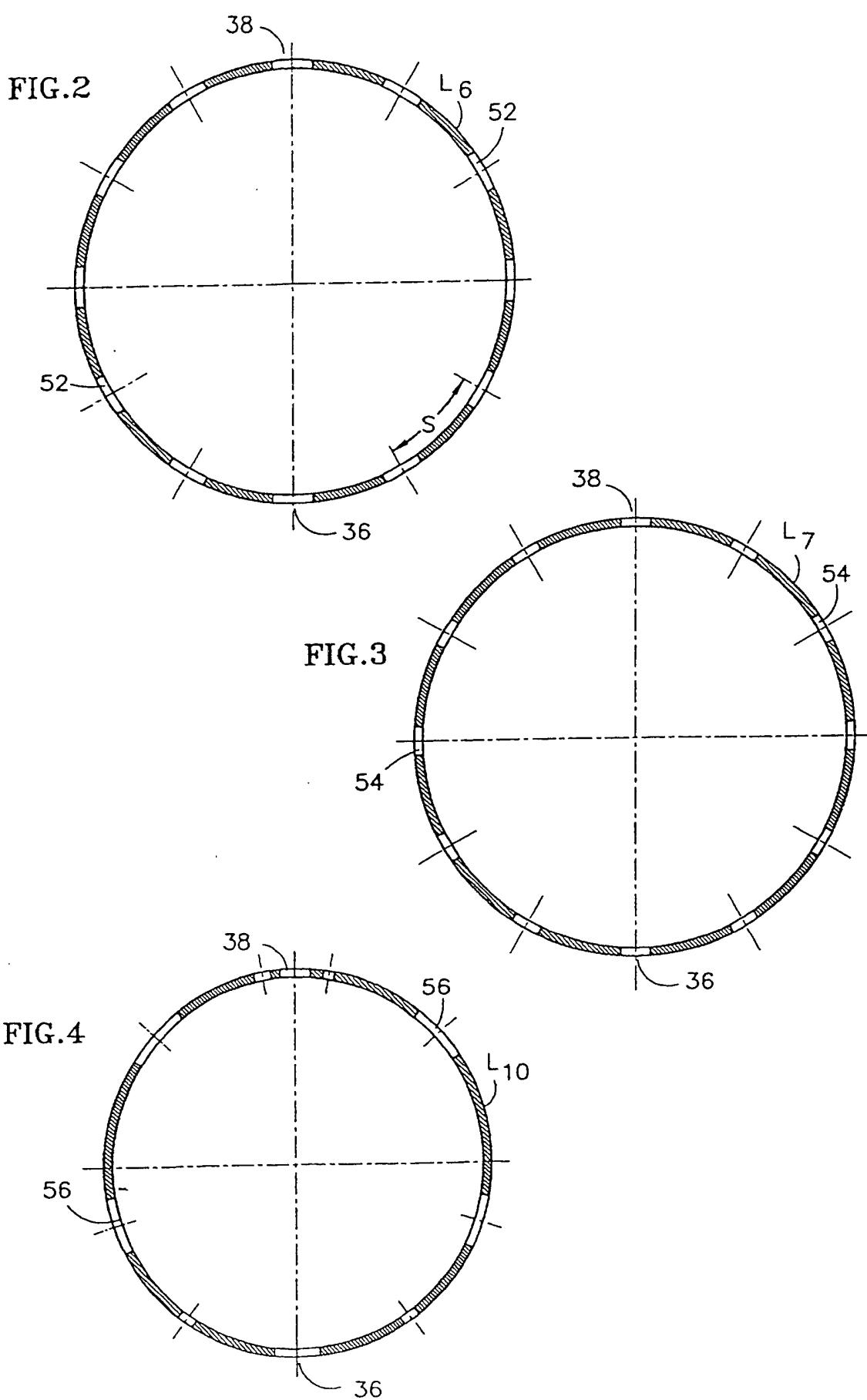


FIG.5

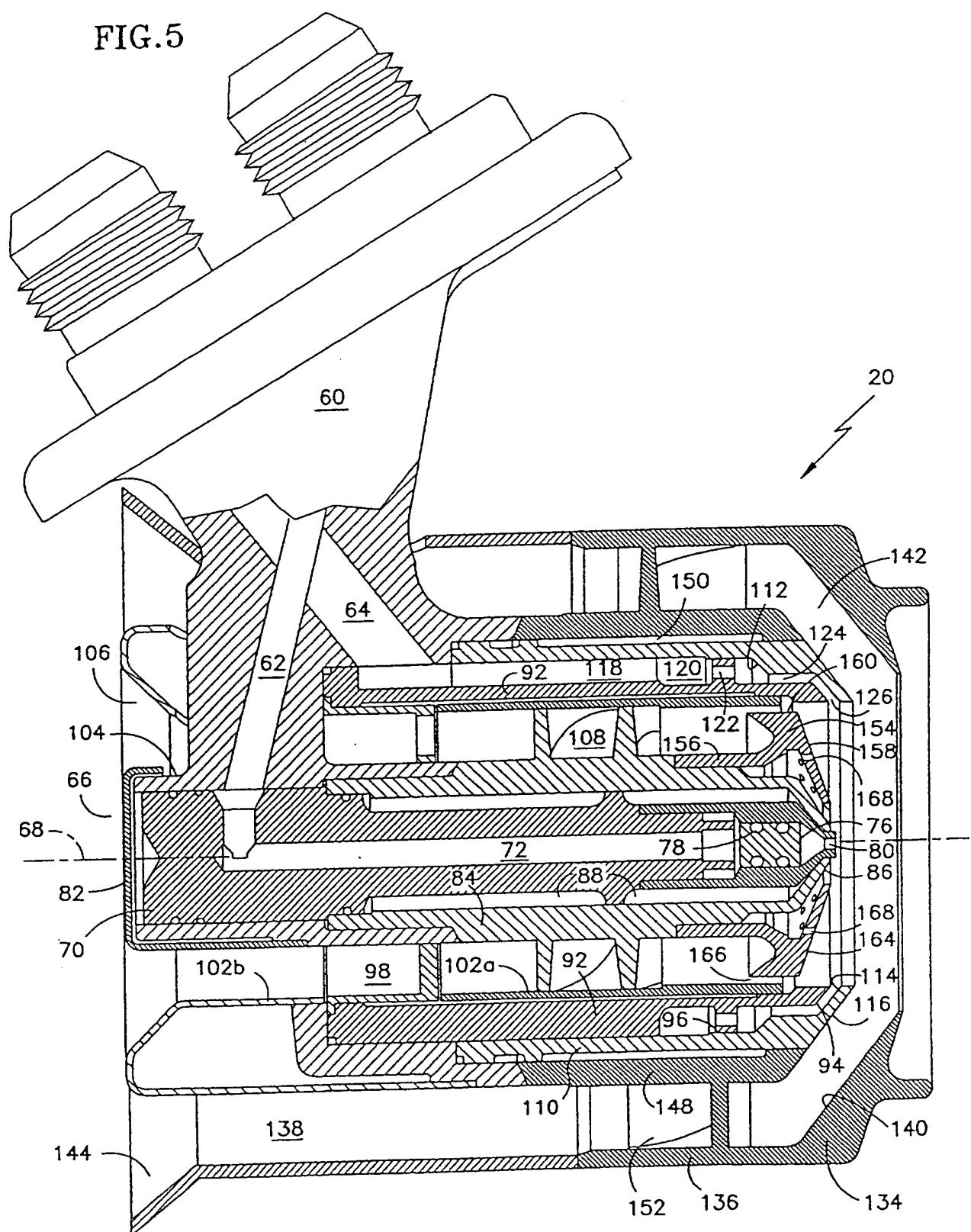


FIG.5A

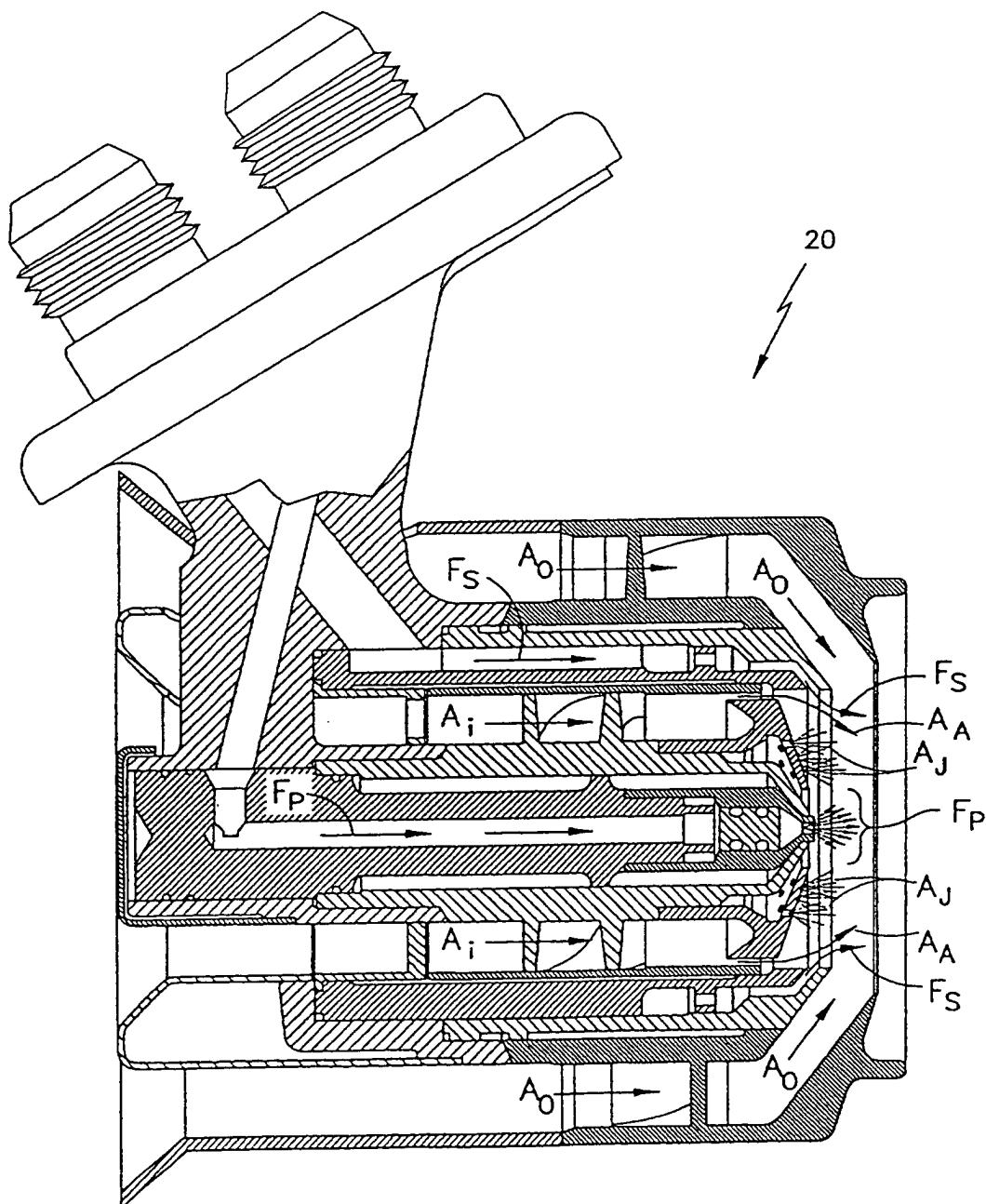


FIG.6

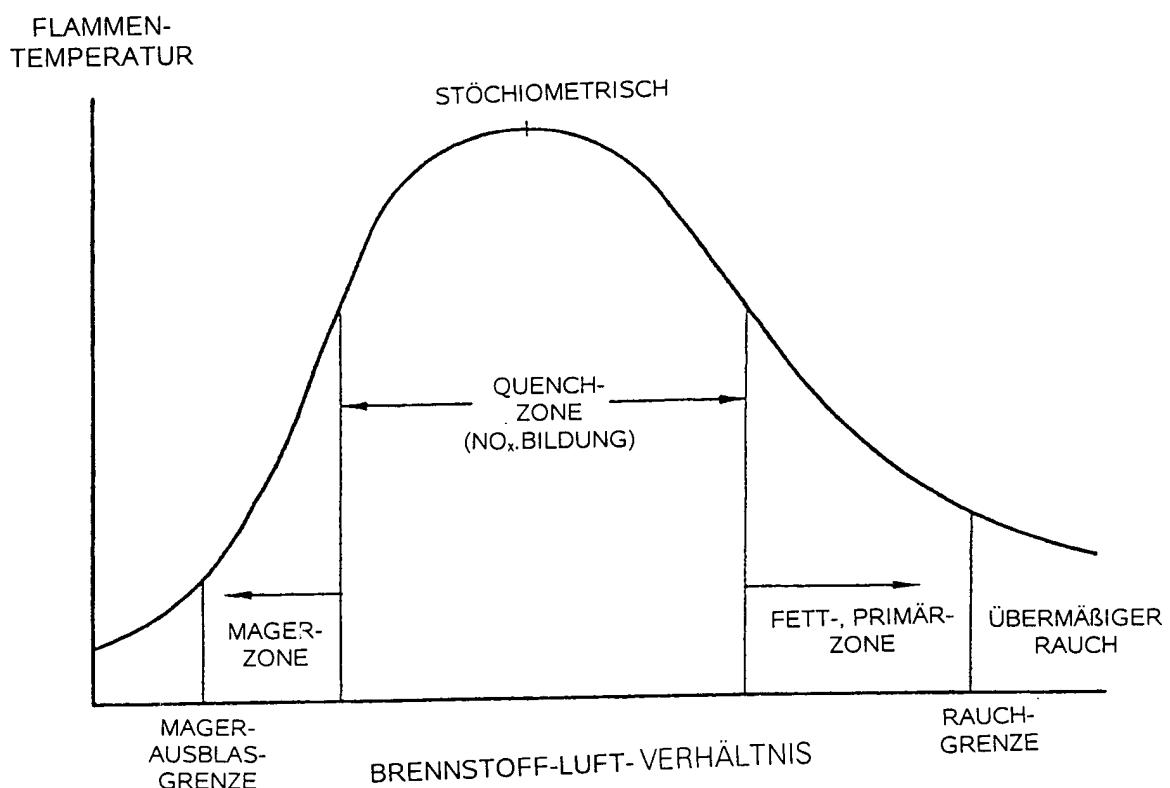


FIG.7

