



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

Int. Cl.²: F 23 C

9/04



PATENT SCHRIFT A5

615 263

②① Gesuchsnummer: 16376/76

②② Anmeldungsdatum: 28.12.1976

③① Priorität(en): 29.12.1975 US 644868

②④ Patent erteilt: 15.01.1980

④⑤ Patentschrift
veröffentlicht: 15.01.1980

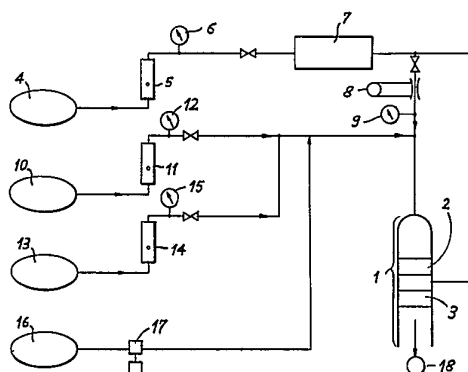
⑦③ Inhaber:
Engelhard Minerals & Chemicals Corporation,
Murray Hill/NJ (US)

⑦② Erfinder:
Robert V. Carrubba, Bridgewater/NJ (US)
Ronald M. Heck, Frenchtown/NJ (US)
George W. Roberts, Westfield/NJ (US)

⑦④ Vertreter:
Hepatex-Ryffel AG, Zürich

⑤④ Verfahren zum Verbrennen von stickstoffhaltigen Brennstoffen.

⑤⑦ Bei diesem Verfahren wird aus dem Brennstoff (10, 13, 16) und einer Luftmenge (4), die wesentlich kleiner ist als die für die vollständige Verbrennung erforderliche Luftmenge, ein erstes Gemisch gebildet und in einer ersten Verbrennungszone (2) in Gegenwart eines Katalysators bei einer Temperatur verbrannt, bei der noch keine merkliche Bildung von Stickoxyden stattfindet. Das Abgas aus der ersten Verbrennungszone wird mit einer zusätzlichen Menge Luft vermischt, welche mindestens für die vollständige Verbrennung aller brennbaren Komponenten des Abgases ausreicht. Das so erhaltene zweite Gemisch wird in einer zweiten Verbrennungszone (3) wieder bei einer Temperatur verbrannt, bei der noch keine merkliche Bildung von Stickoxyden stattfindet. Mit diesem zweistufigen Verfahren können stickstoffhaltige Brennstoffe bei minimaler Stickoxydbildung verbrannt werden.



PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zum Verbrennen von stickstoffhaltigen Brennstoffen bei gleichzeitiger Unterdrückung der Bildung von Stickoxyden aus dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff, dadurch gekennzeichnet, dass aus dem Brennstoff und einer geringeren Luftmenge, als für die vollständige Verbrennung aller brennbaren Komponenten des Brennstoffes erforderlich ist, ein Gemisch gebildet und dieses Gemisch in einer ersten Verbrennungszone in Gegenwart eines Katalysators verbrannt wird, dessen Betriebstemperatur unter der Temperatur liegt, bei welcher eine merkliche Bildung von Stickoxyden oder anderer beständiger Stickstoffverbindungen aus dem im Gemisch vorhandenen Stickstoff stattfinden würde, um einen ersten Abgasstrom zu bilden, dass der erste Abgasstrom mit einer zusätzlichen Menge Luft vermischt wird, welche mindestens für die vollständige Verbrennung aller brennbaren Komponenten, welche im ersten Abgasstrom verbleiben, ausreicht, um ein zweites Gemisch zu bilden, und dass das zweite Gemisch in einer zweiten Verbrennungszone unterhalb einer Temperatur verbrannt wird, bei welcher eine merkliche Bildung von Stickoxyden aus atmosphärischem Stickstoff stattfinden würde.

2. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der stickstoffhaltige Brennstoff 0,05 bis 1 Gewichtsprozent Stickstoff in Form von oxydierbaren, stickstoffhaltigen Verbindungen enthält.

3. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Betriebstemperatur des Katalysators in der ersten Verbrennungszone unterhalb etwa 1800 °C liegt.

4. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Gemisch aus dem Brennstoff und einer Menge Luft, welche unterhalb dem etwa 0,7-fachen Wert der für die vollständige Verbrennung aller brennbaren Komponenten im Brennstoff erforderlichen Menge liegt, gebildet wird.

5. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das zweite Gemisch in der zweiten Verbrennungszone bei einer Temperatur unterhalb etwa 1800 °C verbrannt wird.

6. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Gemisch in der ersten Verbrennungszone unter mindestens annähernd adiabatischen Bedingungen verbrannt wird.

7. Verfahren nach Patentanspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Gemisch mit einer Luftmenge unterhalb dem 0,2- bis 0,5-fachen Wert der für die vollständige Verbrennung erforderlichen Luftmenge gebildet wird.

8. Verfahren nach Patentanspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Betriebstemperatur des Katalysators in der ersten Verbrennungszone zwischen 800 °C und 1800 °C liegt.

9. Verfahren nach Patentanspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass das zweite Gemisch bei einer Temperatur von zwischen 950 °C und 1750 °C verbrannt wird.

10. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Gemisch und das zweite Gemisch unter mindestens annähernd adiabatischen Bedingungen verbrannt werden.

11. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das zweite Gemisch in der zweiten Verbrennungszone thermisch verbrannt wird.

12. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Gemisch in der zweiten Verbrennungszone in Gegenwart eines zweiten Katalysators verbrannt wird.

13. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Gesamtluftmenge im ersten und im zweiten Gemisch zwischen dem 1,5- und dem 2,7-fachen Wert der für die vollständige Verbrennung aller brennbaren Komponenten im Brennstoff erforderlichen Menge liegt.

14. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Gemisch auf zwischen 300 °C und 1000 °C vorerwärmt wird.

15. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Gemisch auf zwischen 300 °C und 700 °C vorerwärmt wird.

16. Verfahren nach Patentanspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorerwärmung mindestens teilweise durch Vorverbrennung vor dem Eingang in den Katalysator erfolgt.

17. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein Teil des Abgasstromes aus der zweiten Verbrennungszone abgekühlt und mit dem ersten Abgasstrom vermischt wird, um den abgekühlten Teil des Abgases aus der zweiten Verbrennungszone erneut einzuspeisen.

18. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Gemisch unter mindestens annähernd adiabatischen Bedingungen verbrannt wird, dass das erste Gemisch eine adiabatische Flammentemperatur aufweist, bei welcher bei Berührung mit dem Katalysator die Betriebstemperatur des Katalysators wesentlich über der augenblicklichen Selbstentzündungstemperatur des ersten Gemisches liegt, wodurch eine fortgesetzte Verbrennung eines Teils des Brennstoffes mit einer die Begrenzung durch den Stofftransport übersteigenden Geschwindigkeit erfolgt.

19. Verfahren nach Patentanspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Abgasstrom mit genügend Luft vermischt wird, um ein zweites, brennstoffarmes Gemisch zur Verbrennung in der zweiten Verbrennungszone unter mindestens annähernd adiabatischen Bedingungen in Gegenwart eines zweiten Katalysators zu bilden, wobei das zweite Gemisch eine derartige adiabatische Flammentemperatur aufweist, dass bei Kontakt mit dem zweiten Katalysator die Betriebstemperatur des zweiten Katalysators über der augenblicklichen Selbstentzündungstemperatur des zweiten Gemisches liegt, wodurch eine fortgesetzte Verbrennung des unverbrannten Brennstoffes im zweiten Gemisch mit einer Geschwindigkeit erfolgt, welche die Begrenzung durch den Stofftransport übersteigt, um einen zweiten Abgasstrom mit hoher thermischer Energie zu bilden.

20. Verfahren nach Patentanspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass die Betriebstemperatur des Katalysators in der ersten Verbrennungszone zwischen 950 °C und 1800 °C liegt.

21. Verfahren nach Patentanspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Betriebstemperaturen des Katalysators in der ersten Verbrennungszone und des zweiten Katalysators in der zweiten Verbrennungszone jeweils zwischen 950 °C und 1800 °C liegen.

22. Verfahren nach Patentanspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Gemisch mit einer Luftmenge von zwischen dem 0,2- und dem 0,7-fachen Wert der für die vollständige Verbrennung erforderlichen Luftmenge gebildet wird.

23. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Abgas vor Übergang in die zweite Verbrennungszone abgekühlt wird.

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbrennen von Brennstoffen, welche stickstoffhaltige Verbindungen enthalten, in solcher Weise, dass die Bildung von Stickoxyden (NO_x) aus solchen Verbindungen, welche gewöhnlich während der Verbrennung auftritt, bedeutend herabgesetzt wird.

Im allgemeinen entstehen Stickoxyde als Nebenprodukte von Verbrennungsprozessen, welche mit Luft bei relativ hohen Temperaturen ablaufen. Mit dem Ausdruck Luft wird hier jedes Gas oder Gasgemisch bezeichnet, welches Sauerstoff für Verbrennungsreaktionen und auch normalerweise inerte Stoffe einschliesslich Stickstoffgas enthält. Der Ausdruck stöchiometrische Menge Luft bezeichnet die Menge Luft, welche theore-

tisch für die vollständige Oxydation aller brennbaren Komponenten in einer gegebenen Menge Brennstoff (beispielsweise zu Kohlendioxyd und Wasser) genügt. Insbesondere in den in Öfen, Heisswasserbereitern, verfahrenstechnischen Trocknungseinrichtungen und Gasturbinen verwendeten Brennern, in welchen die höchsten Verbrennungstemperaturen meistens ca. 1800 °C betragen, wird der atmosphärische Stickstoff der Luftzufuhr zu den Brennern oxydiert, wodurch relativ grosse Mengen von Stickoxyden entstehen. Infolgedessen neigen die herkömmlichen Hochtemperaturbrenner, wie sie für die Erzeugung von Wärme und Energie in der heutigen Technologie verwendet werden, dazu, eine Ansammlung von Stickoxyden in der Atmosphäre zu bewirken. In der Tat ist die Abgabe von Stickoxyden aus verschiedenen Quellen, insbesondere in städtischen Gebieten, zu einer Gefahr für die Umwelt geworden. Aus diesem Grunde sind die Amtsstellen damit beschäftigt, mehr oder weniger strenge Normen für die Emission von Stickoxyden aus allen Verbrennungseinrichtungen aufzustellen.

Die Schwierigkeiten bei der Herabsetzung der Stickoxydemissionen haben durch die Energiekrise zugenommen. Dies ist auf die verminderte Lieferung von relativ sauber brennbaren Kohlenwasserstoff-Brennstoffen, beispielsweise von Erdgas, zurückzuführen, was die Verwendung sogenannter «schmutziger» Brennstoffe attraktiver oder sogar notwendig gemacht hat. Die «schmutzigen» Brennstoffe, beispielsweise Stadtgas, Dieselmotortreibstoff Nr. 6, Schieferöl, und selbstverständlich Kohle und von Kohle abgeleitete flüssige Brennstoffe enthalten meistens als Verunreinigungen grössere Mengen von Stickstoff, d. h. stickstoffhaltige Verbindungen, wie beispielsweise Ammoniak (im Stadtgas), und zyklische und polyzyklische Stickstoffverbindungen, d. h. Verbindungen aus der Gruppe von Carbazol, Pyridin, Indol und Anilin (in einigen flüssigen Brennstoffen). Im allgemeinen wird in den Brennern ein grosser Teil des in den «schmutzigen» Brennstoffen enthaltenen Stickstoffs oxydiert und in Stickoxyde umgewandelt. Die Kombination der Oxydation des atmosphärischen Stickstoffs und der Oxydation der aus den Brennstoffen stammenden stickstoffhaltigen Verbindungen hat zur Entstehung unerwünschter hoher Stickoxydanteile in den Abgasen der bekannten Hochtemperaturbrenner für «schmutzige» Brennstoffe geführt. Daher wurde nach wirksamen Verbrennungsmethoden gesucht, gemäss welchen die Oxydation von stickstoffhaltigen Verbindungen in «schmutzigen» Brennstoffen zu Stickoxyden unterbunden und gleichzeitig die Bildung von Stickoxyden aus atmosphärischem Stickstoff verhindert und weitgehend vermieden wird.

Ein Vorschlag zur Verminderung der Bildung von Stickoxyden auf ein Minimum besteht im Betrieb eines Dampferzeugers mit befeuerten Rohren, in welchem der Brennstoff in zwei Stufen verbrannt wird, wobei der Dampferzeuger etwas grösser ausgestaltet ist, um zwei axial ausgerichtete Brennkammern zu bilden. (Vortrag von D. W. Turner und C. W. Siegmund, «Stufenweise Verbrennung und Abgasrückspeisung: ein leistungsfähiges Verfahren zur Verminderung der Entstehung von NO_x bei Verbrennung von ölartigen Brennstoffen», gehalten an den «American Flame Research Committee Flame Days, Chicago, Illinois, vom 6. bis 7. September 1972). Um die Begrenzung der vollständigen Umwandlung von stickstoffhaltigen Verbindungen im Brennstoff und aus dem atmosphärischen Stickstoff in der Verbrennungsluft zu unterstützen, wurde vorgeschlagen, die erste Stufe mit einem mässigen Brennstoffüberschuss zu betreiben; dem teilweise verbrannten Abgas wird ein geringer Überschuss von Luft zugeführt und der verbleibende unverbrannte Brennstoff in der zweiten Stufe verbrannt. Der abgewandelte Dampferzeuger wurde durch zunehmende Verminderung der Luftzufuhrmenge in Bezug auf die Brennstoffzufuhr auf die erste Stufe getestet. Wird die Luftzufuhr von einem geringen Luftüberschuss über die stöchiometrische Luftmenge

bis zum Brennstoffüberschuss vermindert, nimmt die Totalmenge der gebildeten Stickoxyde ab, obwohl die Temperaturen in der Verbrennungszone hoch bleiben. Wird das Mischungsverhältnis noch weiter in Richtung des Brennstoffüberschusses verschoben, nimmt die Bildung von Stickoxyden weiter ab. Jedoch nehmen gleichzeitig auch die Temperaturen in der Verbrennungszone immer rascher ab, und die Verbrennung in der ersten Stufe wird bei Annäherung an den Betriebsbereich immer instabiler (bei einer Luftmenge von etwa 0,8 bis 0,7 mal die für die vollständige Verbrennung erforderliche Luftmenge), wobei trotz der Anwesenheit grösserer Mengen von stickstoffhaltigen Verbindungen im Brennstoff die grössten Abnahmen der Totalmenge von gebildeten Stickoxyden erreicht werden. So wird es zwecks Ausnützung der Vorteile der erwünschten geringen Bildung von Stickoxyden notwendig, eine Verminderung der Stabilität und Verlässlichkeit der Verbrennung in Kauf zu nehmen oder die Stabilität mit anderen Mitteln zu erhalten, beispielsweise durch lebhaftere Zirkulation in der Verbrennungszone oder durch strenge Begrenzung der zeitlichen Menge des Brennstoff-Luftgemisches, welches die Verbrennungszone durchströmt. Leider führt die Alternative, die Stabilität der Verbrennung durch den Betrieb bei einem höheren Verhältnis zwischen Luft und Brennstoff zu verbessern, zu ziemlich bedeutenden Zunahmen der Totalmenge von gebildeten Stickoxyden. Demnach wäre ein Verbrennungsverfahren mit zuverlässiger Stabilität sogar bei hohen Durchsatzmengen und ohne übermässige Bildung von Stickoxyden aus dem Stickstoff des Brennstoffes und dem atmosphärischen Stickstoff nützlich und erwünscht.

Ein besonders vorteilhaftes Verfahren zur Vermeidung der Bildung bedeutender Mengen von Stickoxyden aus dem atmosphärischen Stickstoff bei der Verbrennung von Brennstoffen zwecks Erzeugung von Wärme und Energie wurde in der US-Patentschrift Nr. 3 928 961 beschrieben. Das Verfahren gemäss dieser früheren Patentschrift, welches einen unter bestimmten Bedingungen in der Verbrennungszone arbeitenden Katalysator verwendet, kann vorteilhaft zur Durchführung einer bevorzugten Ausführungsform des Verfahrens gemäss der vorliegenden Erfindung verwendet werden. Eine andere US-Patentschrift, nämlich Nr. 3 975 900 beschreibt ein Verfahren zur Steuerung eines Brenners, welcher eine Gasturbine speist, um eine konstante Betriebstemperatur eines Katalysators in der Verbrennungszone zu erhalten. Diese Patentschrift erwähnt eine Anzahl von Brennstoffen, deren wesentliches Merkmal der niedrige Gehalt an stickstoffhaltigen Verbindungen ist, beispielsweise handelsübliches Benzin, Naphta, und Propan, und beschreibt die Regelung der Verbrennungstemperatur durch automatische Veränderungen der Brennstoff-Luftgemische, welche so ausgewählt werden, dass sie genügend brennstoffarm oder brennstoffreich bleiben, um bei Temperaturen in der Grössenordnung von 1800 °C oder darunter in Gegenwart des Katalysators zu verbrennen. Werden in einem solchen Verfahren brennstoffreiche Gemische verwendet, kann gemäss dieser Patentschrift das teilweise oxydierte Abgas mit zusätzlicher Luft vermischt und nach dem Katalysator thermisch verbrannt werden.

Die Aufgabe der Erfindung besteht nun darin, ein Verfahren zur Verfügung zu stellen, mit welchem stickstoffhaltige Brennstoffe unter geringerer Stickoxydbildung als in bekannten Verfahren stabil verbrannt werden können.

Gegenstand der Erfindung ist ein Verfahren zum Verbrennen von stickstoffhaltigen Brennstoffen bei gleichzeitiger Unterdrückung der Bildung von Stickoxyden aus dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff, welches Verfahren dadurch gekennzeichnet ist, dass aus dem Brennstoff und einer geringeren Luftmenge, als für die vollständige Verbrennung aller brennbaren Komponenten des Brennstoffes erforderlich ist, ein Gemisch gebildet und dieses erste Gemisch in einer ersten

Verbrennungszone in Gegenwart eines Katalysators verbrannt wird, dessen Betriebstemperatur unter der Temperatur liegt, bei welcher eine merkliche Bildung von Stickoxyden oder anderer beständiger Stickstoffverbindungen aus dem im Gemisch vorhandenen atmosphärischen Stickstoff stattfinden würde, um einen ersten Abgasstrom zu bilden, dass der erste Abgasstrom mit einer zusätzlichen Menge Luft vermischt wird, welche mindestens für die vollständige Verbrennung aller brennbaren Komponenten, welche im ersten Abgasstrom verbleiben, ausreicht, um ein zweites Gemisch zu bilden, und dass das zweite Gemisch in einer zweiten Verbrennungszone unterhalb einer Temperatur verbrannt wird, bei welcher eine merkliche Bildung von Stickoxyden aus atmosphärischem Stickstoff stattfinden würde.

Gemäss einer bevorzugten Ausführungsform wird das erste Gemisch aus Brennstoff durch intensive Vermischung gebildet und umfasst auch eine Menge Luft, welche wesentlich geringer ist als die für die vollständige Verbrennung aller brennbaren Komponenten des Brennstoffs erforderliche Luftmenge. Dieses Brennstoffgemisch kann in Gegenwart des Katalysators unter im wesentlichen adiabatischen Bedingungen in der ersten Verbrennungszone verbrannt werden, um einen ersten Abgasstrom zu bilden, wobei das erste Gemisch eine solche adiabatische Flammentemperatur aufweisen kann, dass bei Berührung mit dem Katalysator die Betriebstemperatur des Katalysators wesentlich über der augenblicklichen Selbstentzündungstemperatur des ersten Gemisches, jedoch unterhalb einer Temperatur liegt, welche zu einer merklichen Bildung von Stickoxyden oder anderer beständiger Stickstoffverbindungen aus dem im Gemisch vorhandenen atmosphärischen Stickstoff führen würde, wodurch eine kontinuierliche Verbrennung eines Teils des Brennstoffs bei einer Geschwindigkeit erreicht wird, welche die Begrenzung durch den Stofftransport überschreitet. Dieser erste Abgasstrom wird wiederum mit einer zusätzlichen Menge Luft vermischt, welche mindestens zur vollständigen Verbrennung zwecks Bildung eines zweiten Gemisches ausreicht, welches in einer zweiten Verbrennungszone unterhalb einer Temperatur verbrannt wird, welche zu einer merklichen Bildung von Stickoxyden aus dem atmosphärischen Stickstoff führen würde; die Verbrennung in der zweiten Verbrennungszone kann nötigenfalls in Gegenwart eines Katalysators erfolgen.

Anhand der Zeichnung werden nachstehend Ausführungsbeispiele des erfindungsgemässen Verfahrens näher erläutert.

Fig. 1 ist eine graphische Darstellung zum Vergleich der Entstehung von Stickoxyden (NO_x) aus im Brennstoff vorhandenem Stickstoff durch zweistufige Verbrennung gemäss einer Ausführungsform der Erfindung und durch eine einstufige Verbrennung unter Verwendung eines innigen Gemisches aus Brennstoff und Luft unter brennstoffarmen Bedingungen in Gegenwart eines Katalysators gemäss dem Verfahren der obenerwähnten US-PS 3 975 900. Zu Vergleichszwecken wurde die zweistufige Verbrennung mit einem Katalysator von hoher Wirksamkeit und thermischer Stabilität in der ersten Stufe und einem ähnlichen Katalysator mit entsprechender Wirksamkeit und Stabilität in der zweiten Stufe durchgeführt.

Die Fig. 2 ist eine graphische Darstellung zum Vergleich der Mengen (in ppm bezogen auf Abgas) der Stickoxyde, die aus dem im Brennstoff enthaltenen und dem atmosphärischen Stickstoff durch zweistufige Verbrennung gemäss dem Ausführungsbeispiel der Erfindung unter Verwendung von Brennstoffen entstehen, welche 0,17 Gew.-% Stickstoff in stickstoffhaltigen Verbindungen enthalten, mit den Mengen von Stickoxyden, welche entstehen würden, wenn alle stickstoffhaltigen Verbindungen im Brennstoff in Stickoxyde umgewandelt würden.

Die Fig. 3 ist ein Strömungsschema eines zweistufigen Brenners, welcher sich für die Ausführungsbeispiele des Ver-

fahrens gemäss der vorliegenden Erfindung eignet und zur Beschaffung der Versuchsergebnisse in den nachstehenden Beispielen verwendet wurde.

Die zweistufige Verbrennung eines stickstoffhaltigen Brennstoffs in der Einrichtung gemäss Fig. 3 umfasst eine erste Verbrennungsstufe oder Verbrennungszone mit einem Katalysator; eine zweite Verbrennungs-Stufe oder -Zone; die Zufuhr eines brennstoffreichen Brennstoff-Luftgemisches zur ersten Stufe; und die Zufuhr von zusätzlicher Luft zum Abgasstrom aus der ersten Stufe zwecks Beschaffung einer Luftmenge, welche mindestens für die vollständige Verbrennung ausreicht. Zusätzlich kann das der ersten Verbrennungsstufe zugeführte Brennstoff-Luftgemisch vorerwärmt, die zusätzlich dem ersten Abgasstrom der ersten Stufe zugeführte Luft vorerwärmt, das in die erste Verbrennungsstufe eintretende Gemisch zwecks Vorwärmung mit oder ohne Einspritzung von zusätzlichem Brennstoff vor Eintritt in die erste Stufe durch thermische Vorverbrennung vorerwärmt, eine oder beide Verbrennungsstufen gekühlt, das Abgas aus einer oder aus beiden Verbrennungsstufen gekühlt und ein Teil der Abgase aus der zweiten Stufe nach Entfernung von Energie aus dem die Verbrennungseinrichtung verlassenden Abgas zum Einlass der ersten Stufe und/oder zum Einlass der zweiten Stufe zurückgeführt werden.

Als Beispiele geeigneter Kühlungs- und Rückführungsschritte kann es sich als besonders vorteilhaft erweisen, das Abgas aus der zweiten Stufe zu kühlen und darauf ganz oder teilweise mit dem Abgas der ersten Stufe zu vermischen und wieder in die zweite Verbrennungsstufe einzuleiten. Eine andere Möglichkeit, welche sich als besonders vorteilhaft erweisen könnte, besteht darin, den Abgasstrom aus der ersten Stufe zu kühlen, bevor er der zweiten Stufe zugeführt wird. Diese Kühlung kann vor, während oder nach der Vermischung der Luft und/oder der Rückführungsgase mit dem Abgasstrom der ersten Stufe erfolgen. Vorzugsweise wird der Abgasstrom beim Verlassen der ersten Stufe zwecks Verwendung seiner thermischen Energie durch Wärmeübergang gekühlt. Diese Möglichkeit ist besonders nützlich, wenn das Gesamtverhältnis zwischen Luft und Brennstoff nahezu stöchiometrisch ist, beispielsweise wenn die zweistufige Verbrennung zum Betrieb eines Ofens oder eines Dampferzeugers verwendet wird, wodurch die Temperatur der zweiten Verbrennungsstufe unter der Temperatur gehalten wird, bei welcher sich Stickoxyde bilden würden.

Der Ausdruck «stickstoffhaltiger Brennstoff» umfasst Brennstoffe, welche einen wesentlichen Gehalt an oxydierbaren, stickstoffhaltigen Verbindungen aufweist; in diesem Zusammenhang werden elementarer Stickstoff, N_2 , und Stickoxyde selbst nicht als oxydierbare, stickstoffhaltige Verbindungen betrachtet. Gewöhnlich wird ein Brennstoff, welcher weniger als ca. 0,05 Gewichtsprozent in Form solcher stickstoffhaltiger Verbindungen enthält, nicht als stickstoffhaltiger Brennstoff betrachtet. Unter den Brennstoffen, welche zur Speisung verwendet werden können, sind Wasserstoff, wie er im Abgas aus der Syntheseschleife in Ammoniak-Herstellungsanlagen enthalten ist, und Kohlenwasserstoffe und verwandte kohlenstoffhaltige Brennstoffe, zum Beispiel die niedrigen Btu-Gasbrennstoffe wie Leuchtgas und Synthesegas, flüssige Brennstoffe wie Dieselmotoren, und teilweise Oxydationsprodukte aller dieser Brennstoffe zu verstehen. Diese Brennstoffe enthalten häufig stickstoffhaltige brennbare Verbindungen, welche im natürlichen, rohen Brennstoff ihren Ursprung haben und deren Entfernung aus dem Brennstoff vor der Verwendung teuer oder schwierig ist. Dies ist bei den meisten reichlich vorhandenen flüssigen Brennstoffen, wie sie nachstehend aufgezählt sind, der Fall, und Leuchtgas und Synthesegase enthalten ebenfalls häufig grössere Mengen von gasförmigen stickstoffhaltigen Verbindungen in Form von Ammoniak oder Wasserstoffcyanid. Jeder zugeführte gasförmige oder flüssige Brenn-

stoff kann mit stickstoffhaltigen Verbindungen verunreinigt worden sein. Stickstoff kommt gewöhnlich in der Form von oxydierbaren, stickstoffhaltigen Verbindungen in den erhältlichen «schmutzigen» Brennstoffen vor, welche ohne weiteres nach der hier beschriebenen Methode verbrannt werden können, und zwar in Mengen von ca. $\frac{1}{20}$ bis ca. 1 Gewichtsprozent, gerechnet als Stickstoff. Die Verbrennung von Brennstoffen, welche stickstoffhaltige Verbindungen in geringeren Mengen enthalten, würden normalerweise keine ernsthafte Luftverschmutzung infolge von Umwandlung des Stickstoffs in solchen Verbindungen zu Stickoxyden bewirken. Auch kann die hier beschriebene Methode zur Vermeidung einer mengenmässig bedeutenden Umwandlung von stickstoffhaltigen Verbindungen in Brennstoffen mit beträchtlichem Stickstoffgehalt, beispielsweise Schieferöl, und in Brennstoffen, deren Stickstoffgehalt etwas über einem Prozent liegt, insbesondere in synthetischen flüssigen Brennstoffen, welche aus Kohle durch Pyrolyse, Hydrierung oder Extraktion erzeugt wurden, zu luftverschmutzenden Stickoxyden, sehr wirksam sein. Zwecks Erläuterung und zu Vergleichszwecken wurden mit Brennstoffen, welche etwas über 0,1% Stickstoff und mit anderen Brennstoffen, welche etwa 1% Stickstoff enthalten, umfangreiche Versuche durchgeführt, welche nachstehend erläutert werden, wobei die Verwendung solcher Brennstoffe in Verbrennungseinrichtungen mit geringer Luftverschmutzung bei den gegenwärtigen Bedingungen der Beschaffung und der Kosten von Brennstoffen von äusserstem Interesse ist.

Stickstoff kommt normalerweise in flüssigen Brennstoffen in Form von heterozyklischen Stickstoffverbindungen vor. Beispielsweise wurde gefunden, dass ein Rohöl aus Kalifornien Stickstoff enthält, wobei die Prozentsätze den Stickstoffgehalt in Bezug auf die Brennstoffmenge bezeichnen, und zwar ca. 0,3% Carbazole und substituierte Carbazole, je ca. 0,2% Chinoline und Pyridine und ca. 0,1% Indole. Pyridin kann beispielsweise beim Cracken Amine und bei nachherigem Erhitzen Ammoniak und Wasserstoffcyanid bilden. Bei typischen Verbrennungstemperaturen zersetzt sich Pyridin zu einer Kette von Äthylen-Kohlenstoffatomen, welche gewöhnlich in Endstellung Stickstoff enthalten, und eine weitere Zersetzung führt ohne weiteres zur Bildung von Produkten wie Acetonitril, Acrylnitril, und Wasserstoffcyanid. Diese und andere Zwischenprodukte der Pyrolyse neigen ihrerseits dazu, in oxydierender Umgebung bei gewöhnlichen Verbrennungstemperaturen rasch Stickoxyde zu bilden. So ist Pyridin ein Beispiel einer oxydierbaren, stickstoffhaltigen Verbindung, wie sie in flüssigen «schmutzigen» Brennstoffen vorkommen, welche dazu neigen, bei Verbrennung unerwünschte atmosphärische Schmutzstoffe zu bilden.

Versuche haben gezeigt, dass der Zusatz von gleichen Mengen Pyridin, Piperidin (gesättigtem Pyridin) oder Chinolin beispielsweise zu einem stickstofffreien Brennstoff im wesentlichen unter denselben Verbrennungsbedingungen wie bei den die natürlich vorkommenden Pyridine oder Chinoline enthaltenden Brennstoffen den gleichen Ausstoss von Stickoxyden ergibt. In ähnlicher Weise bilden Ammoniak und Amine wie Methylamin, Äthylamin, Diäthylamin und Anilin, welche auch in natürlich vorkommenden Brennstoffen enthalten sein können, während der Verbrennung unter oxydierenden Bedingungen Stickoxyde. Es wurde auch festgestellt, dass die Verbrennung von Dieselmotoren mit Pyridin oder Chinolin bei üblichen Temperaturen zur Bildung praktisch derselben Menge von Stickoxyden führt wie die Verbrennung einer entsprechenden Menge von handelsüblichem Propan, dem eine entsprechende Menge von Stickstoff in Form von Ammoniak zugegeben wurde. Versuche haben bestätigt, dass die gewöhnliche Verbrennung von handelsüblichem Propan mit 0,9 Gewichtsprozent Stickstoff in der Form von Ammoniak beinahe soviel Stickoxyde, nämlich ca. 92%, bildet, wie sich in den normalen

Verbrennungsprodukten von Dieselmotoren mit 0,9 Gewichtsprozent Stickstoff als Pyridin bildet. Demnach wurde die Wirksamkeit des beschriebenen Verfahrens unter Verwendung von standardisierten Brennstoffen geprüft und demonstriert, in welchen «schmutzigen» Brennstoffen durch Zusatz von vorbestimmten Mengen Ammoniak zu einem typischen gasförmigen Brennstoff wie handelsübliches Propan und durch Zusatz von vorbestimmten Mengen Pyridin zu einem typischen flüssigen Brennstoff wie Dieselmotoren Nr. 2 mit niedrigem Stickstoffgehalt dargestellt werden. Die Auswahl des Katalysators für die erste Stufe und – falls erwünscht – für die zweite Stufe der Verbrennungseinrichtung kann von der Zufuhrtemperatur des Brennstoff/Luftgemisches, der Katalysatortemperatur, der adiabatischen Reaktionstemperatur des Gemisches, dem Bedarf an adäquater thermischer Stabilität für bestimmte Betriebsdauern bei der Betriebstemperatur des Katalysators und allgemein von den Zündungs- und Aktivitätseigenschaften abhängen, welche von den Brennstoffgemischen, den Temperaturen, den Durchsatzmengen und der geometrischen Anordnung des Brenners bestimmt werden. Es können Oxydationskatalysatoren, welche ein Nichtedelmetall wie Cerium, Chrom, Kupfer, Mangan, Vanadium, Zirkonium, Nickel, Kobalt oder Eisen, oder ein Edelmetall wie Silber oder ein Metall aus der Platingruppe enthalten, verwendet werden. Der Katalysator kann ein Festbett- oder ein Fließbettkatalysator sein. Bei relativ recht hohen Zufuhr- und Verbrennungstemperaturen können zweckmässig ein oder mehrere feuerbeständige Elemente mit Gasdurchlässen oder ein Bett von feuerfesten Kugeln, Ringen oder dergleichen ohne Einschluss von teuren Materialien mit grösserer spezifischer katalytischer Tätigkeit verwendet werden. Bevorzugte Katalysatoren für die Durchführung des obenerwähnten Verbrennungsverfahrens nach der US-PS 3 928 961 beispielsweise bei Temperaturen in der Grössenordnung von 1100 °C bis 1650 °C sind Elemente in der Form von monolithischen Wabenstrukturen aus einem Kern von keramischem feuerfesten Material. Für verbesserte Betriebscharakteristiken oder zur Verwendung bei niedrigeren Zufuhr- oder Katalysatortemperaturen kann ein solcher Kern mit einem haftenden Überzug in Form eines kalzinierten Streifens aus aktiver Tonerde versehen sein, welcher zwecks Erzielung guter thermischer Eigenschaften stabilisiert sein kann, und welchem vorzugsweise ein katalytisch aktives Metall aus der Platingruppe, beispielsweise Palladium oder Platin oder eine Mischung beider zugesetzt wurde. Die Notwendigkeit hoher katalytischer Aktivität hängt weitgehend von der Temperatur des Verbrennungsgemisches am Eingang des Katalysators ab. Je niedriger die Zufuhrtemperatur ist, desto höher ist die gewöhnlich für den stabilen Betrieb der Verbrennungsstufe erforderliche Aktivität. Dieses Erfordernis kann sehr wichtig sein, wenn die Betriebstemperatur des Katalysators ebenfalls relativ hoch ist, da die thermische Alterung eines Katalysators dazu neigt, die Minimaltemperatur, bei welcher die Entzündung eines Zufuhrgemisches nach Abkühlung des Katalysators stattfindet, zu erhöhen.

Die erste Verbrennungsstufe des Verfahrens verwendet ein oder mehrere Katalysatorelemente. Die Verbrennung in Gegenwart eines Katalysators kann in herkömmlicher Weise ablaufen, beispielsweise bei Temperaturen in der Verbrennungszone in der Grössenordnung von 550 °C bis 800 °C. Jedoch wird als Verbrennungsverfahren zur Anwendung gemäss der vorliegenden Erfindung, wie es nachstehend näher erläutert wird, die katalytisch unterstützte thermische Verbrennung gemäss der obenerwähnten US-PS 3 928 961 vorgezogen. Die erste Verbrennungszone wird mit einem mit einer wesentlich geringeren Menge Luft, als für die Verbrennung aller brennbaren Komponenten in der Brennstoffzufuhr erforderlich, gebildeten Brennstoff-Luftgemisch gespiesen. Zusätzlich zur Vermeidung oxydierender Bedingungen bewirkt die Ver-

wendung eines in geeigneter Weise mit Brennstoff angereicherten Gemisches (unter Berücksichtigung der Zufuhrtemperatur und der inerten Komponenten), dass die Temperatur in der Verbrennungszone und die Betriebstemperatur des Katalysators unter einer Temperatur liegen, welche zu einer merklichen Bildung von Stickoxyden oder anderer stabiler Stickstoffverbindungen, beispielsweise Ammoniak oder Wasserstoffcyanid, aus dem im Brennstoff-Luftgemisch vorhandenen atmosphärischen Stickstoff führen würde. Normalerweise sollte zur Vermeidung einer merklichen Bildung stabiler Stickstoffverbindungen die Betriebstemperatur des Katalysators in der ersten Verbrennungszone nicht über ca. 1700 °C bis ca. 2100 °C liegen, je nach Brennerdruck, Luftmenge in Bezug auf die stöchiometrische Menge, und der Art des Brennstoffes. In diesem Zusammenhang kann die Verweilzeit der Gase bei solchen Temperaturen in der den Katalysator enthaltenden Verbrennungszone auch die Eignung der Zusammensetzung des Gemisches bestimmen, da sehr kurze Verweilzeiten die begleitende Bildung von stabilen Stickstoffverbindungen aus dem atmosphärischen Stickstoff bedeutend herabsetzen können.

In der ersten Verbrennungsstufe unter Verwendung eines Katalysators kann beispielsweise das Brennstoff/Luftverhältnis das 0,1-fache des stöchiometrischen Verhältnisses oder sogar noch weniger betragen. Vorzugsweise liegt das Verhältnis zwischen Brennstoff und Luft in der ersten Verbrennungsstufe unter etwa dem 0,7-fachen, und oft vorzugsweise zwischen dem 0,2-fachen und dem 0,5-fachen der für die vollständige Verbrennung erforderlichen Luftmenge, wodurch der rasche Verbrauch der zur Verfügung stehenden Luft unter Vermeidung einer unerwünschten Bildung von stabilen Stickstoffverbindungen wie Stickoxyden erleichtert wird. Es sei auch darauf hingewiesen, dass bei einem Verhältnis zwischen Luft und Brennstoff von weniger als dem 0,3-fachen der stöchiometrischen Luftmenge im Abgas Kohlenwasserstoffe, welche noch nicht reagiert haben, sowie Kohlenmonoxyd und Wasserstoff vorhanden sein können.

Bei Durchführung der zweistufigen Verbrennung unter Anwendung des bevorzugten Bereiches von Mengenverhältnissen zwischen Luft und Brennstoff in der ersten Stufe kann die Verbrennung in der ersten Stufe vorzugsweise unter im wesentlichen adiabatischen Bedingungen erfolgen, um ein Abgas mit hoher thermischer Energie zu erhalten. Zusätzlich kann, wenn die Luftmenge in der ersten Stufe das 0,2-fache bis 0,5-fache der stöchiometrischen Luftmenge beträgt, dieser Verbrennungsprozess vorteilhaft ohne Kühlung irgendeines Teils der Verbrennungseinrichtung erfolgen, um sicherzustellen, dass die erste Verbrennungsstufe unterhalb Temperaturen arbeitet, bei welchen eine merkliche Bildung von Stickoxyden stattfinden würde. So kann sowohl das brennstoffreiche Gemisch in der ersten Stufe als auch ein brennstoffarmes Gemisch in der zweiten Stufe unter im wesentlichen adiabatischen Bedingungen verbrannt werden (wobei die Temperatur der Verbrennungszone und daher die Betriebstemperatur des Katalysators in der oder den Katalysatorstufen infolge Wärmeübertragung aus der Verbrennungszone oder dem Katalysator um nicht mehr als ca. 170 °, vorzugsweise um nicht mehr als etwa 85 °C von der adiabatischen Flammentemperatur des in die Verbrennungszone eintretenden Gemisches abweicht). Auch bei Verwendung des bevorzugten Bereiches der Mengenverhältnisse zwischen Luft und Brennstoffen kann die erste Verbrennungsstufe vorteilhaft bei hohen Durchsätzen, beispielsweise von etwa 0,05 bis 10 oder mehr m³ verbranntes Gas pro Stunde (bei normaler Temperatur und normalem Druck) pro m³ Volumen der den Katalysator enthaltenden Verbrennungszone) betrieben werden. Dadurch werden Mittel zur Erzeugung von thermischer Energie in grossen Mengen in einer zweistufigen Verbrennungseinrichtung von brauchbarem Ausmass geschaffen, wobei gleichzeitig die Mengen von

aus stickstoffhaltigen Verbindungen im Brennstoff und aus atmosphärischem Stickstoff in den zwei Stufen des Verfahrens gebildeten Stickoxyden auf ein Minimum herabgesetzt werden.

Die zweite Verbrennungsstufe des Verfahrens kann entweder thermische, d. h. homogene, oder die Verbrennung in Gegenwart eines Katalysators anwenden. Die Verbrennung kann unter im wesentlichen adiabatischen Bedingungen erfolgen, um ein Abgas mit hohem Energiegehalt zu erhalten. Wird ein Katalysator verwendet, kann derselbe vom gleichen Typus oder einem anderen Typus als der in der ersten Stufe verwendete Katalysator sein. Beispielsweise kann die zweite Stufe einen oder mehrere Katalysatoren mit relativ geringerer Aktivität, beispielsweise Schirme und perforierte Platten aus Metall, beispielsweise aus rostfreiem Stahl oder Inconel, und nicht überzogene Keramikwaben umfassen.

Das Abgas aus der ersten Stufe wird mit einer zusätzlichen Menge Luft vermischt, welche mindestens zur vollständigen Verbrennung aller in diesem Abgas verbleibenden brennbaren Komponenten ausreicht, um ein zweites brennbares Gemisch zu bilden. Mit bestimmten Einrichtungen kann die stöchiometrische Luftmenge, welche gerade zur vollständigen Verbrennung ausreicht, verwendet werden, beispielsweise wenn aus dem ersten Abgas Wärme entfernt wird, um die Temperatur des Gasgemisches, welches in die zweite Stufe eintritt, herabzusetzen, oder wenn die durch die zweite Stufe strömenden Gase gut vermischt und aus der nicht adiabatisch betriebenen Verbrennungszone Wärme abgezogen wird. Auf jeden Fall wird das zweite Gemisch in der zweiten Verbrennungszone bei einer Temperatur verbrannt, welche unterhalb der Temperatur liegt, welche zur merklichen Bildung von Stickoxyden aus atmosphärischem Stickstoff (N₂) führen würde.

Die Mittel zur Zufuhr eines brennstoffreichen Brennstoff-Luftgemisches zur ersten Verbrennungsstufe können jede herkömmliche Einrichtung zur innigen Vermischung mindestens eines Teils des Brennstoffs mit Luft und zur Zufuhr des erhaltenen Brennstoff-Luftgemisches zum ersten Katalysator, einschliesslich üblicher Drucklufterzeugungs-, Zufuhrsteuerungs- und Ventileinrichtungen umfassen.

Die Mittel zur Zufuhr von mehr Luft zum Abgas der ersten Stufe können zweckmässig eine oder mehrere Düsen umfassen, welche gleichmässig in einer Kammer verteilt sind, welche die erste und die zweite Stufe miteinander verbindet. Vorzugsweise sind die Düsen gleichmässig in der Kammer zwischen der ersten und der zweiten Stufe verteilt, so dass die Temperatur- und Brennstoffkonzentrationsprofile des aus dem Abgas der ersten Stufe und zusätzlicher Luft erhaltenen Gemisches für die Verbrennung in der zweiten Stufe optimal ausgewählt werden können. Jedoch sollten die Mittel zur Zufuhr der zusätzlichen Luft die vollständige Vermischung der zusätzlichen Luft mit dem Abgasstrom der ersten Stufe ermöglichen, bevor eine weitere Verbrennung stattfindet. Dies kann erreicht werden, indem die Kammer und die Luftdüsen so ausgebildet werden, dass sie die gründliche Vermischung der zusätzlichen Luft mit dem Abgasstrom der ersten Stufe fördern und bewirken, dass die Gasgeschwindigkeit zwischen den Stufen des Verfahrens über der kritischen Geschwindigkeit zur Bildung einer stabilen Flamme liegt. Dadurch kann die Oxydation des atmosphärischen Stickstoffs zu Stickoxyden zwischen den Stufen dieses Verfahrens auf ein Minimum reduziert werden.

Bei Durchführung des Verfahrens können die Betriebstemperaturen in ziemlich weiten Grenzen variieren, aber die Temperaturen der ersten und der zweiten Verbrennungsstufe liegen normalerweise nicht über etwa 1750 °C. Beispielsweise können die Temperaturen der Abgasströme der ersten und der zweiten Stufe dieses Verfahrens vorzugsweise etwa 550 °C bis etwa 1750 °C betragen. Vorzugsweise werden für die erste adiabatische Stufe Verbrennungstemperaturen von etwa 800 °C bis 1500 °C angewendet, und in der zweiten Stufe treten

Temperaturen von ca. 950 °C bis 1650 °C auf. Auch in diesem Verfahren können alle Kombinationen von Zufuhrtemperaturen zu den einzelnen Stufen, der Kühlung individueller Stufen, und der Mengenverhältnisse zwischen Brennstoff und Luft in der Zufuhr zum Verbrennungsprozess angewendet werden, welche diese Betriebstemperaturen ergeben.

Wenn die oben erwähnte katalytisch unterstützte thermische Verbrennung in der Verbrennungszone der ersten Stufe unter im wesentlichen adiabatischen Bedingungen durchgeführt werden soll, wird ein flüssiger oder gasförmiger, stickstoffhaltiger und kohlenstoffhaltiger Brennstoff zur Bildung eines innigen Gemisches mit Luft verwendet, und die Verbrennung dieses brennstoffreichen Gemisches in der ersten Verbrennungszone ist dadurch gekennzeichnet, dass das erste Gemisch am Eingang des Katalysators eine adiabatische Flammentemperatur aufweist, bei welcher beim Kontakt mit dem Katalysator, welcher mindestens einen grösseren Teil und vorzugsweise den gesamten Strömungsquerschnitt der ersten Verbrennungszone einnimmt, die Betriebstemperatur des Katalysators wesentlich über der augenblicklichen Selbstentzündungstemperatur des ersten Gemisches liegt (bei welcher die Zündverzögerung des den Katalysator erreichenden Gemisches im Vergleich zur Verweilzeit in der Verbrennungszone des zu verbrennenden Gemisches vernachlässigbar ist). Unter diesen Bedingungen wird eine kontinuierliche Verbrennung eines Teils des Brennstoffes mit einer Geschwindigkeit durchgeführt, welche die Stofftransportbegrenzung übersteigt, um einen ersten Abgasstrom zu bilden. Wenn der unverbrannte kohlenstoffhaltige Brennstoff im ersten Abgasstrom dann durch katalytisch unterstützte thermische Verbrennung in der zweiten Stufe verbrannt werden soll, wird der erste Abgasstrom mit genügend Luft vermischt, um ein zweites brennstoffarmes Gemisch zu bilden, welches in der zweiten Verbrennungszone unter im wesentlichen adiabatischen Bedingungen in Gegenwart eines zweiten Katalysators verbrannt wird, und die Verbrennung in der zweiten Verbrennungszone ist dadurch gekennzeichnet, dass das zweite Gemisch am Eingang zum zweiten Katalysator eine solche adiabatische Flammentemperatur aufweist, dass bei Berührung mit dem zweiten Katalysator die Betriebstemperatur dieses Katalysators wesentlich über der augenblicklichen Selbstentzündungstemperatur des zweiten Gemisches liegt. Die fortgesetzte Verbrennung des im zweiten Gemisch verbleibenden unverbrannten Brennstoffs wird dadurch mit einer Geschwindigkeit durchgeführt, welche die Stofftransportbegrenzung überschreitet, um einen zweiten Abgasstrom mit hohem thermischem Energiegehalt zu bilden. Das erste und das zweite Gemisch werden vorzugsweise so gebildet und zusammengesetzt, dass die Betriebstemperaturen der Katalysatoren der ersten bzw. der zweiten Verbrennungszone im Bereich von etwa 950 °C bis etwa 1750 °C liegen. Der Katalysator der zweiten Verbrennungszone muss unter Umständen nicht so aktiv wie der erste Katalysator sein, weil im allgemeinen der zweite Katalysator aus der ersten Verbrennungsstufe während der ganzen Betriebsdauer einen erwärmten Abgasstrom aufnimmt.

Auch bei Durchführung des Verfahrens sind besondere Druckgefälle und Brennstoffdurchsätze nicht von ausschlaggebender Bedeutung. Beispielsweise können in der ersten Stufe Druckgefälle von 10% oder weniger des Totaldruckes und Durchsätze von 0,05 bis 10 Millionen m³ des total verbrannten Gases und m³ Katalysator (bei Normaltemperatur und Normaldruck) pro Stunde angewendet werden.

Ferner kann bei Durchführung dieses Verfahrens die Totalmenge Luft vorzugsweise das ca. ein- bis dreifache der für die vollständige Oxydation der brennbaren kohlenstoffhaltigen Komponenten des Brennstoffs erforderlichen Menge betragen. Jedoch wird bei Anwendung des Verbrennungsverfahrens in einem Ofen vorgezogen, dass die Gesamtmenge der der Ein-

richtung zugeführten Luft etwa das 1- bis 1,2-fache der zur vollständigen Oxydation des kohlenstoffhaltigen Brennstoffs erforderlichen Luftmenge beträgt und dass bei Verwendung des Verbrennungsverfahrens für eine Gasturbine die Gesamtmenge der Luft etwa das 1,5- bis 2,7-fache der stöchiometrischen Luftmenge beträgt.

Ferner ist in diesem Verfahren die Geschwindigkeit des Brennstoff-Luftgemisches beim Eintritt in die erste Stufe nicht von ausschlaggebender Bedeutung und kann vorzugsweise jede Geschwindigkeit sein, welche über der höchsten Flammenausbreitungsgeschwindigkeit liegt. Beispielsweise beträgt eine geeignete Gasgeschwindigkeit gewöhnlich über etwa 1 Meter pro Sekunde, kann jedoch je nach Faktoren wie Temperatur, Druck und Zusammensetzung des zugeführten Brennstoff-Luftgemisches bedeutend höher liegen.

Das der ersten Verbrennungsstufe zugeführte Brennstoff-Luftgemisch oder die zusätzliche, dem Abgasstrom der ersten Stufe zugeführte Luft, oder auch beide, können gemäss dem vorliegenden Verfahren in üblicher Weise vorerwärmt werden. Wenn jedoch die Vorerwärmung des zugeführten Brennstoff-Luftgemisches durch Vorverbrennung erfolgt, sollte nur eine kontrollierte Vorverbrennung erfolgen. Mit kontrollierter Vorverbrennung ist gemeint, dass die Temperatur des zugeführten Brennstoff-Luftgemisches beim Eintritt in den Katalysator der ersten Stufe dieses Verfahrens auf nicht mehr als ca. 1000°, vorzugsweise auf nicht mehr als ca. 700 °C erhöht wird, indem ein Teil des Brennstoffs vor der ersten Stufe verbrannt wird. Die kontrollierte Vorverbrennung kann in üblicher Weise katalytisch oder thermisch erfolgen. Die kontrollierte Vorverbrennung ist besonders für die Schaffung genügend hoher Temperaturen am Eingang zum Katalysator der ersten Stufe geeignet, welche genügend hoch sind, um die Verdampfung relativ schwerer Brennstoffe, beispielsweise Schieferöl, zu ermöglichen, wodurch die Schaffung eines innigen Gemisches von Brennstoff und Luft zwecks Erzeugung einer homogenen Mischung am Eingang zum in der Verbrennungsstufe der ersten Stufe verwendeten Katalysator erleichtert wird. Die kontrollierte Vorverbrennung ist auch bei der Schaffung von Temperaturen beim Eingang des Katalysators der ersten Stufe nützlich, welche höher liegen als die Zündtemperatur der verwendeten Brennstoffzufuhr. In dieser Beziehung ist die kontrollierte Vorverbrennung von besonderer Bedeutung, wenn dieses Verbrennungsverfahren mit einem Brennstoff mit einer relativ hohen Zündtemperatur, beispielsweise Methan, durchgeführt wird, und wenn keine Mittel, beispielsweise ein Kompressor, vorhanden sind, um die Verbrennungsluft über die Umgebungstemperatur zu erwärmen.

Das der ersten Stufe zugeführte Brennstoff-Luftgemisch oder die zusätzlich dem Abgas der ersten Stufe zugeführte Luft, oder auch beide, können auch Abgase aus der zweiten Stufe enthalten, welche nach Entzug der Energie in üblicher Weise zurückgeführt wurden. Die Stufen dieses Verfahrens oder die Abgase aus den Stufen können gemäss der vorliegenden Erfindung auch in üblicher Weise gekühlt werden.

In Fig. 1 ist für die Verbrennung eines stickstoffhaltigen Brennstoffs der in NO_x umgewandelte Stickstoff des Brennstoffs in Mol.-% (Ordinate) in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt des Brennstoffs in Gew.-% (Abszisse) dargestellt. Die gestrichelte Kurve gilt für eine einstufige brennstoffarme Verbrennung (nicht erfindungsgemäss) mit einem Luft/Brennstoff-Gewichtsverhältnis von 38. Die ausgezogene Kurve gilt für eine zweistufige Verbrennung nach einer Ausführungsform der Erfindung, erste Stufe brennstoffreich (Luft/Brennstoff-Verhältnis = 20 bis 50% des stöchiometrischen Verhältnisses), zweite Stufe brennstoffarm, mit einem Gesamt-Luft/Brennstoff-Verhältnis von ebenfalls 38.

Wie aus den Kurven gemäss Fig. 1 ersichtlich und nachstehend in Bezug auf die nachstehenden Beispiele näher erläutert,

unterdrückt das beschriebene Verbrennungsverfahren die Bildung von Stickoxyden aus dem in den verwendeten «schmutzigen» Brennstoffen enthaltenen Stickstoff.

Unter den gemäss Fig. 1 vorliegenden Bedingungen wurde der Stickstoffgehalt des Brennstoffs im nach dem Zweistufenverfahren verbrannten Brennstoff-Luftgemisch variiert, und etwa 25% bis etwas über 65% des im Brennstoff enthaltenen Stickstoffes wurde nicht in NO_x umgewandelt. Beim einstufigen Betrieb wurden jedoch nur zwischen etwa 6% und 13% des Stickstoffes im Brennstoff nicht in NO_x umgewandelt. In allgemeiner Anwendung des vorliegenden Verfahrens wurden etwa 20% bis 65% des Stickstoffes im Brennstoff nicht zu Stickoxyden oxydiert. Ferner wird durch Begrenzung der Verbrennungstemperaturen sowohl in der ersten als auch in der zweiten Stufe die Oxydation des Stickstoffes in der Atmosphäre weitgehend vermieden.

Die Gesamtmenge der bei zweistufiger Verbrennung entstehenden Stickoxyde für einen eine Stickstoffverbindung enthaltenden Brennstoff, welcher 0,17 Gew.-% Stickstoff liefert, ist in der Fig. 2 in ppm NO_x bei 15 Vol.-% O_2 (Ordinate) in Abhängigkeit vom in der ersten Stufe verwendeten Luft/Brennstoff-Verhältnis bezogen auf das stöchiometrische Verhältnis (Abszisse) dargestellt (ausgezogene Kurve) und mit dem mittleren NO_x -Gehalt für 100%ige Umwandlung der Stickstoffverbindung im Brennstoff in NO_x (gestrichelte Kurve) verglichen. Das Zweistufenverfahren setzte den Stickoxydgehalt im Abgas auf weniger als zwei Drittel des Stickoxydgehaltes bei Oxydierung sämtlichen im Brennstoff enthaltenen Stickstoffes zu Stickoxyden herab.

Die Beispiele, welche in den nachstehenden Tabellen zusammengefasst sind, dienen zur näheren Erläuterung des Verfahrens.

In diesen Beispielen waren die verwendeten Brennstoffe Propan und Dieseltreibstoff. Die dem Propan beigegebene Stickstoffverunreinigung bestand aus Ammoniak, und die stickstoffhaltige Verunreinigung im Dieseltreibstoff war Pyridin. Die Beispiele wurden unter Verwendung einer Vorrichtung durchgeführt, wie sie im Verfahrensschema der Fig. 3 gezeigt ist, in welcher zwei Verbrennungsstufen in einem einzigen Verbrennungsgehäuse 1 gezeigt sind, nämlich eine Katalysatorstufe 2 und eine zweite Verbrennungsstufe 3 mit oder ohne Katalysator. Dem Verbrennungsgehäuse 1 wurde Luft aus einem Reservoir 4 über ein Rotometer 5, eine Druckanzeigeeinrichtung 6, einen Vorerhitzer 7, einen Strömungsmesser 8 und eine zweite Druckanzeigeeinrichtung 9 zugeführt sowie Ammoniak aus einem Reservoir 10 über ein Rotometer 11 und eine Druckanzeigeeinrichtung 12 und gasförmiger Brennstoff aus einem Reservoir 13 über ein Rotometer 14 und eine Druckanzeigeeinrichtung 15 oder flüssiger Brennstoff aus einem Reservoir 16 über eine Pumpe 17. Der NO_x -Gehalt am Ausgang der zweiten Verbrennungsstufe 3 wurde mittels eines Analysators 18 ermittelt.

Vergleichsversuche mit einer einstufigen brennstoffarmen Verbrennung, bezeichnet durch das Wort «keine» an der Stelle der Daten über die zweite Verbrennungsstufe (nicht erfindungsgemäss), wurden durch Zufuhr des brennstoffarmen Gemisches zur ersten katalysatorhaltigen Stufe 2 der Vorrichtung gemäss Fig. 3 angestellt. Die anderen Beispiele mit einer brennstoffreichen ersten Stufe und einer brennstoffarmen zweiten Stufe wurden durch Zufuhr des brennstoffreichen Gemisches zur ersten Stufe 2 der Vorrichtung gemäss Fig. 3 und durch Beimischung zusätzlicher Luft zum Abgas der ersten Stufe vor dessen Eintritt in die zweite Stufe 3 ausgeführt, wobei die zweite Stufe 3 eine thermische Verbrennungseinrichtung sein oder einen Katalysator enthalten kann. In den meisten Beispielen wurde ein Gesamtgewichtsverhältnis zwischen Luft und Brennstoff von ca. 38:1, d. h. ein Luftüberschuss von ca. 142%, verwendet.

In jedem Beispiel bestand die erste Stufe 2 aus einem Palladium-Oxydationskatalysator auf einem mit Streifen beschichteten, monolithischen wabenförmigen Substrat. Die Wabe war in einem Metallgehäuse untergebracht, welches einen nominalen Durchmesser von 5 cm hatte und parallele Strömungskanäle von einer Länge von ca. 2,5 cm aufwies, welche sich durch die Wabenstruktur hindurch erstreckten. Die Wabe wies auch etwa 16 Strömungskanäle pro cm^2 Querschnitt auf, wobei die Wände zwischen den Kanälen etwa 0,25 mm dick waren. Der Katalysator bestand aus einer Zirkonium-Mullit-Wabe, welche etwa 12 Gewichtsprozent stabilisierte kalzinierte Streifen trug, welche in erster Linie Aluminiumoxyd und auch Chromoxyd und Ceroxyd enthielten, welche ihrerseits ca. 0,2% (des Gesamtgewichtes) Palladium enthielten. Die den Katalysator enthaltende erste Stufe wurde wie in der obenerwähnten US-PS 3 928 961 beschrieben angeordnet und betrieben.

In jedem Beispiel enthielt die zweite Stufe einen feuerfesten Katalysator von hoher Wirksamkeit oder einen einfachen keramischen Katalysator. In den zu Vergleichszwecken angeführten Beispielen einstufiger Verbrennung strömten die Abgase der ersten Stufe einfach ohne Einführung von Sekundärluft durch die eingeschaltete Mischungszone, und weiter durch die zweite Stufe zur Auspuff- und Analysatorzone. Der in der zweiten Stufe verwendete einfache Keramik-Katalysator war eine Zirkonium-Mullit-Wabe der vorstehend im Zusammenhang mit der ersten Stufe beschriebenen Art, welche in einem Metallgehäuse untergebracht war und einen nominalen Durchmesser von 5 cm und parallele Strömungskanäle von ca. 2,5 cm Länge, welche sich durch die Wabe hindurch erstreckten, aufwies.

Jedoch enthielt der Katalysatorkörper gemäss diesen Beispielen keinen kalzinierten Streifen und kein Palladium-Katalysatormaterial auf einer streifenbeschichteten Zirkonium-Mullit-Wabe, wie dies vorstehend im Zusammenhang mit dem Katalysator der ersten Stufe beschrieben wurde, und diese Art von behandeltem monolithischem Katalysator kann zweckmässig als beschichteter Katalysator bezeichnet werden.

Auch wurden in jedem Beispiel die Luft-Brennstoff-Verhältnisse als Gewichtsverhältnisse berechnet, die Temperaturen wurden in Celsiusgraden und die Emissionen in Teilen pro Million (ppm) im Volumen gemessen. Die Durchsätze in jedem Beispiel wurden aufgrund der Standardtemperatur (25 °C) und des Standarddruckes (1 Atm.) berechnet. Die Beispiele wurden ohne Wärmeentzug aus den Verbrennungsstufen oder aus der Kammer zwischen den Stufen berechnet, abgesehen von den üblichen unvermeidlichen Wärmeverlusten, so dass beide Stufen und die gesamte Einrichtung unter im wesentlichen adiabatischen Bedingungen arbeiteten.

In den nicht erfindungsgemässen Vergleichsversuchen, welche den einstufigen Betrieb (mit der Bezeichnung «keine» für die zweite Stufe in den Tabellen) zeigen, wurde die dem Brenner zugeführte Luft vorgeheizt, so dass die Brennerzufuhrtemperatur zwischen 340 °C und 360 °C (etwas höher als in Beispiel 5 und etwas tiefer als in Beispiel 17) lag. In diesen Beispielen einstufiger Verbrennung arbeitete der Katalysator bei Temperaturen im Bereich von etwa 1100 °C bis 1450 °C.

Im zweistufigen Verbrennungsverfahren wird das erste Luft-Brennstoffgemisch, welches der ersten Stufe zugeführt wird, auf zwischen etwa 300 °C und ca. 1000 °C, jedoch, wie oben erwähnt, vorzugsweise auf Temperaturen unterhalb etwa 700 °C, erwärmt. Bei Verwendung beider Verbrennungsstufen wird die Betriebstemperatur des Katalysators in der ersten Verbrennungszone oder Verbrennungsstufe vorzugsweise im Bereich von etwa 800 °C bis 1750 °C gehalten. In den in den nachstehenden Tabellen beschriebenen Beispielen zweistufiger Verbrennung arbeitete der Katalysator der ersten Verbrennungsstufe bei geschätzten Temperaturen im Bereich von etwa 800 °C bis 1100 °C, und die Zufuhrtemperatur zur zweiten Stufe lag im Bereich von etwa 900 °C bis 1000 °C. In vielen die-

ser Beispiele zweistufiger Verbrennung lag die Temperatur des Brennstoff-Luftgemisches am Eingang zum Katalysator der ersten Stufe im Bereich von 375 °C bis 500 °C. Gemäss einer anderen, manchmal vorteilhaften Arbeitsweise wird das der ersten Verbrennungsstufe zugeführte Brennstoff-Luftgemisch stärker, d. h. auf ca. 700 °C bis 1000 °C aufgeheizt. So wurde gemäss den Beispielen 18–20 das Brennstoff-Luftgemisch nach Eintritt in die in Fig. 3 angedeutete Verbrennungseinrichtung, jedoch vor Erreichen des Katalysators, einer geringen thermischen Vorverbrennung unterworfen, so dass die Temperatur des Brennstoff-Luftgemisches am Eingang des Katalysators, d. h. an der Stelle, wo die Verbrennung in Gegenwart des Katalysators beginnt, etwa 350 °C höher lag als bei dem in den Brenner eintretenden Gemisch. Gemäss den Beispielen 7 und 14 fand eine stärkere Verbrennung zwischen dem Eingang des Brenners und dem Eingang in den Katalysator selbst statt, und die Eingangstemperaturen am Katalysator wurden auf 932 °C bzw. auf 890 °C geschätzt. Eine gewisse Vorverbrennung fand auch gemäss den übrigen Beispielen statt.

Wie aus den Resultaten der Beispiele der zweistufigen Verbrennung gemäss den nachstehenden Tabellen ersichtlich, wurden wesentliche Abnahmen der Konzentration der Stickoxyde im Abgas der Verbrennung eines stickstoffhaltigen Brennstoffes durch Schaffung einer ersten Verbrennungszone oder Verbrennungsstufe mit dem Katalysator, welche mit Brennstoffüberschuss und einer Luftmenge, welche mit Brennstoffüberschuss und einer Luftmenge, welche das 0,7-fache der zur vollständigen Verbrennung aller brennbaren kohlenstoffhaltigen Komponenten im Brennstoff erforderlichen Luftmenge nicht überschreitet, arbeitet, was ein Gewichtsverhältnis zwischen Luft und Brennstoff von etwa 11:1 oder weniger für Propan oder von etwa 10,5:1 oder weniger für Dieseltreibstoff bedeutet, und durch Schaffung einer zweiten Verbrennungszone oder Verbrennungsstufe, welche im allgemeinen im brennstoffarmen Bereich arbeitet, erreicht. In einer bevorzugten Ausführungsform des Verfahrens wird das erste Brennstoff-Luftgemisch, welches der ersten Stufe zugeführt wird, mit einer Luftmenge gebildet, welche etwa das 0,2- bis 0,5-fache der zur vollständigen Verbrennung erforderlichen Luftmenge beträgt. Vorzugsweise wird auch das zweite Gemisch, welches durch Vermischung des Abgases aus der ersten Stufe mit einer zusätzlichen Menge Luft, welche mindestens zur vollständigen Ver-

brennung aller noch im Abgas der ersten Stufe verbleibenden brennbaren Komponenten ausreicht, gebildet wird, bei Temperaturen von zwischen etwa 950 °C und etwa 1650 °C verbrannt. Die Gesamtmenge der Luft in den Gemischen, welche der ersten und der zweiten Stufe zugeführt wird, liegt vorzugsweise etwa zwischen dem 1,5- und dem 2,7-fachen der für die vollständige Verbrennung aller brennbaren Komponenten im Brennstoff erforderlichen Luftmenge, um einen Abgasstrom zu erhalten, welcher sich insbesondere für den Antrieb einer Turbine eignet.

Diese Beispiele zeigen, dass für Brennstoffe mit stickstoffhaltigen Verbindungen im Bereich von etwa einem halben bis einem Gewichtsprozent etwa 80 bis 90% des Stickstoffs als Stickoxyde im Abgas einer einstufigen Verbrennungseinrichtung ausgestossen werden, während im Abgas einer zweistufigen Verbrennungseinrichtung mit einem Brennstoffüberschuss in der ersten Stufe nur etwa 35 bis 55% Stickoxyde enthalten sind. Ebenso wird bei einem Gehalt des Brennstoffs an Stickstoffverbindungen, welcher etwa $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{4}$ % reinem Stickstoff entspricht, von etwa 85% bis zu allem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff als Stickoxyde abgegeben, wenn die Verbrennung in einer einstufigen Verbrennungsanlage erfolgt, während im Abgas einer zweistufig betriebenen Verbrennungsanlage relativ viel kleinere Anteile von etwa 50% bis 80% als Stickoxyde auftraten. Für Brennstoffe, deren Gehalt an stickstoffhaltigen Verbindungen zwischen den oben genannten Grenzen, d. h. bei etwa $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ Gewichtsprozent Stickstoff liegt, ist zu erwarten, dass bei Verwendung der Zweistufenmethode etwa 40%, in jedem Falle jedoch wesentlich weniger als 70% des im Brennstoff enthaltenen Stickstoffs als Stickoxyde auftreten können, während der grösste Teil des Stickstoffs im Brennstoff wiederum im Abgas der einstufigen Verbrennungseinrichtung als Stickoxyde auftritt. Die Beispiele zeigen auch, dass diese sehr erheblichen Abnahmen der Stickoxydemissionen in einem weiten Bereich von Betriebsvariablen, beispielsweise des Durchsatzes, des Brennstoffüberschusses bei Zufuhr zum ersten Katalysator, des Stickstoffgehaltes im Brennstoff, der Temperatur der Abgase beim Verlassen des Brenners, des Druckgefälles, der kontrollierten Vorverbrennung des zugeführten Gemisches, und der Verwendung verschiedener Arten von Katalysatoren in der zweiten Stufe erzielt werden können.

Tabelle der Beispiele:

Beispiel	1	2	3	4	5	6	7
Erste Stufe, mit Katalysator							
Auf Brennkammervolumen bezogener stündlicher							
Durchsatz (h^{-1})	206 000	64 000	42 000	59 000	128 000	131 000	70 000
Luftdurchsatz (kg/h)	34,9	3,3	2,0	4,4	22,2	22,2	4,0
Brennstoffdurchsatz (kg/h)	1,0*	1,0*	1,0*	0,5*	0,6*	0,6*	0,6
Gewicht N im Brennstoff, %	0,87	0,8	0,8	0,91	0,94	0,83	0,83
Gewichtsverhältnis Luft/Brennstoff	37,0	3,2	1,9	6,2	39,3	38,0	7,9
Luftäquivalenzverhältnis	2,36	0,204	0,121	0,395	2,72	2,42	0,439
Eingangstemperatur des Katalysators	340	480	510	640	990	350	932
Zweite Stufe	keine				keine	keine	
Katalysator		unbeschichtet	unbeschichtet	unbeschichtet			unbeschichtet
Eingangstemperatur (°C)		900	990	965			1000

Tabelle der Beispiele:

Beispiel	1	2	3	4	5	6	7
	5						
Auf Brennkammervolumen bezogener stündlicher Durchsatz (h ⁻¹)		566 000	566 000	333 000			350 000
Luftdurchsatz (kg/h)		31,6	33,0	14,4			18,2
Gesamtluftdurchsatz (kg/h)	34,9	34,9	34,9	17,7	22,2	22,2	22,2
Gesamtgewichtsverhältnis Brennstoff/Luft	37,0	33,8	33,8	32,8	39,3	38,0	38,0
Gesamt-Luftäquivalenzverhältnis	2,36	2,15	2,15	2,09	2,72	2,42	2,42
Ausstossdaten							
Ausstosstemperatur (°C)	–	869	1155	1385	1200	1190	1200
Emissionen -- CO (ppm)	–	51	34	48	7,8	–	55
Emissionen -- HC (ppm)	–	6	4	–	3,0	4	4
Emissionen -- NO _x (ppm)	390	175	210	275	450	380	150
Ausstoss N zu NO _x , %	81,6	36,7	44,0	49,0	90,6	86,1	34,0

* Ammoniakhaltiges Propan

** Pyridinhaltiger Dieseltreibstoff

Tabelle der Beispiele:

Beispiel	8	9	10	11	12	13	14
Erste Stufe, mit Katalysator							
Auf Brennkammervolumen bezogener stündlicher Durchsatz (h ⁻¹)	193 000	90 000	191 000	80 000	50 000	131 000	50 000
Luftdurchsatz (kg/h)	32,9	5	3,3	5,1	8,6	22,2	2,9
Brennstoffdurchsatz (kg/h)	0,9*	0,9*	1,2**	1,2**	1,3*	0,6*	0,4*
Gewicht N im Brennstoff, %	0,99	0,99	0,94	0,94	0,71	0,16	0,16
Gewichtsverhältnis Luft/Brennstoff	36,4	5,6	27,1	4,2	6,9	38,0	7,0
Luftäquivalenzverhältnis	2,32	0,357	1,88	0,290	0,439	2,42	0,446
Eingangstemperatur des Katalysators (°C)	350	400	350	380	460	345	890
Zweite Stufe Katalysator	keine	beschichtet	keine	beschichtet	beschichtet	keine	unbeschichtet
Eingangstemperatur (°C)		690		1085	1155		875
Auf Brennkammervolumen bezogener stündlicher Durchsatz (h ⁻¹)		532 000		523 000	563 000		255 000
Luftdurchsatz (kg/h)		27,9		27,9	26,0		12,9
Gesamtluftdurchsatz (kg/h)	32,9	32,9	32,9	33,0	34,6	22,2	15,8
Gesamtgewichtsverhältnis Brennstoff/Luft	36,4	36,6	27,1	27,1	27,5	38,0	38,2
Gesamt-Luftäquivalenzverhältnis	2,32	2,33	1,88	1,88	1,75	2,42	2,43
Ausstossdaten							
Ausstosstemperatur (°C)	1220	1470	1445	1295	1255	1100	1060
Emissionen -- CO (ppm)	2,5	–	7	–	6,5	4	–
Emissionen -- HC (ppm)	–	–	–	–	–	8	2,5
Emissionen -- NO _x (ppm)	475	200	605	380	180	86	59
Ausstoss N zu NO _x , %	86,0	36,2	86,3	54,4	34,5	98,2	68,0

* Ammoniakhaltiges Propan

** Pyridinhaltiger Dieseltreibstoff

Tabelle der Beispiel

Beispiel	15	16	17	18	19	20
Erste Stufe, mit Katalysator						
Auf Brennkammervolumen bezogener stündlicher Durchsatz (h^{-1})	193 000	90 000	167 000	50 000	70 000	50 000
Luftdurchsatz (kg/h)	32,9	5,0	34,6	8,6	3,8	2,7
Brennstoffdurchsatz (kg/h)	0,9*	0,9*	1,0*	1,4*	1,0*	0,7*
Gewicht N im Brennstoff, %	0,19	0,22	0,17	0,15	0,18	0,17
Gewichtsverhältnis Luft/Brennstoff	36,4	5,6	33,4	6,4	4,0	4,0
Luftäquivalenzverhältnis	2,32	0,356	2,13	0,408	0,255	0,255
Eingangstemperatur des Katalysators ($^{\circ}\text{C}$)	345	405	304	700	700	710
Zweite Stufe Katalysator	keine	beschichtet	keine	beschichtet	unbeschichtet	unbeschichtet
Eingangstemperatur ($^{\circ}\text{C}$)		720		1185	1065	975
Auf Brennkammervolumen bezogener stündlicher Durchsatz (h^{-1})		532 000		564 000	590 000	421 000
Luftdurchsatz (kg/h)		27,9		26,0	32,6	23,4
Gesamtluftdurchsatz	32,9	32,9	34,6	34,6	36,4	25,7
Gesamtgewichtsverhältnis Brennstoff/Luft	36,4	36,6	33,4	25,6	38,5	38,6
Gesamt-Luftäquivalenzverhältnis	2,32	2,33	2,13	1,63	2,45	2,46
Ausstossdaten						
Ausstosstemperatur ($^{\circ}\text{C}$)	1215	1465	1360	1260	1265	1270
Emissionen -- CO (ppm)	2,5	-	7,5	10,0	-	40
Emissionen -- HC (ppm)	-	-	2,5	2,0	-	3
Emissionen -- NO_x (ppm)	88	68	135	63	68	70
Ausstoss N zu NO_x , %	83,5	54,5	100,0	53,5	74,5	79,0

* Ammoniakhaltiges Propan

** Pyridinhaltiger Dieseltreibstoff

FIG. 1

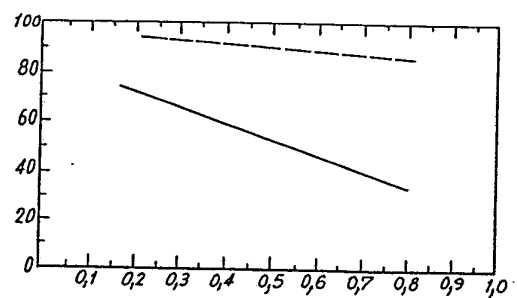


FIG. 2

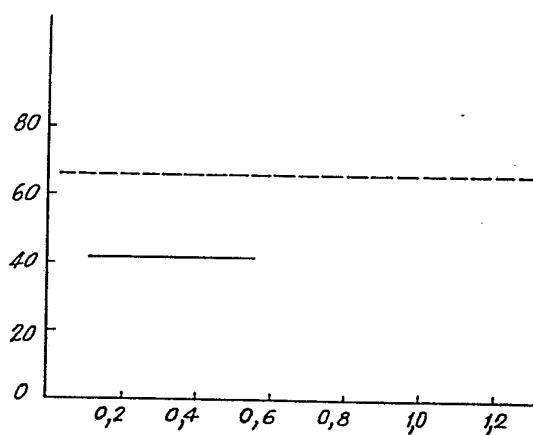


FIG. 3

