



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2006 016 912 A1** 2007.12.13

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2006 016 912.3**

(22) Anmeldetag: **11.04.2006**

(43) Offenlegungstag: **13.12.2007**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **C01B 3/00** (2006.01)

**B01D 1/14** (2006.01)

**B01D 1/16** (2006.01)

(71) Anmelder:

**Forschungszentrum Jülich GmbH, 52428 Jülich,  
DE**

(72) Erfinder:

**Porš, Zdeněk, 52428 Jülich, DE; Tschauer,  
Andreas, 49492 Westerkappeln, DE; Pasel,  
Joachim, Dr., 52428 Jülich, DE; Peters, Ralf, Dr.,  
52146 Würselen, DE; Stolten, Detlef, Prof. Dr.,  
52076 Aachen, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

**DE10 2004 055425 A1**

**DE10 2004 041815 A1**

**DE 198 60 308 A1**

**US2004/00 01 983 A1**

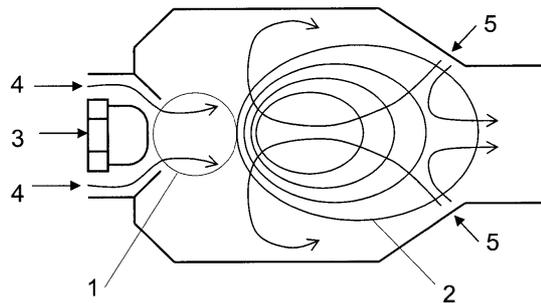
**US 60 45 772 A**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Verdampfen eines flüssigen Kraftstoffs sowie eine Mischkammer zur Durchführung dieses Verfahrens**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Verfahren zur Verfügung gestellt, mit dem ein flüssiger Kraftstoff in zwei Stufen vollständig verdampft wird. In der ersten Stufe wird der Kraftstoff mit einem heißen primären Medium vermischt und teilweise verdampft. In der zweiten Stufe wird der bereits verdampfte Kraftstoffanteil teilweise oxidiert, was die Wärme für die vollständige Verdampfung der bisher noch nicht verdampften Kraftstoffanteile liefert. Ein Kraftstoff-Luft-Gemisch für einen Reformier lässt sich mit einer vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens gewinnen, bei der der Kraftstoff nach der erfindungsgemäßen Verdampfung homogen mit Oxidationsmittel durchmischt wird. Zur Durchführung des Verfahrens wird eine Mischkammer zur Verfügung gestellt.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verdampfen eines flüssigen Kraftstoffs, welches insbesondere zur Herstellung eines Kraftstoff-Oxidationsmittel-Gemisches geeignet ist, sowie eine Mischkammer zur Durchführung dieses Verfahrens.

## Stand der Technik

**[0002]** Neben der klassischen Dampfreformierung zur Wasserstoffproduktion stellt die autotherme Reformierung eine vielversprechende Alternative dar. Dabei reagiert ein Sauerstoff-Wasser-Gemisch im Reaktor ohne externe Wärmequelle mit Kohlenwasserstoff  $C_nH_m$  entsprechend folgender Gleichungen:  $C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (m/2 + n)H_2$   $\Delta H_R > 0$  (Dampfreformierung)  $C_nH_m + n/2O_2 \rightarrow m/2H_2 + nCO$   $\Delta H_R < 0$  (partielle Oxidation)

**[0003]** Für Methan  $CH_4$  ( $n = 1$ ,  $m = 4$ ) stellen sich die Reaktionsgleichungen wie folgt dar:  $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$   $\Delta H_R = +206$  kJ/mol  $CH_4 + 0,5O_2 \rightarrow CO + 2H_2$   $\Delta H_R = -35$  kJ/mol

**[0004]** Der Sauerstoff wird in der Regel mittels Luft bereitgestellt. Die Wärme, die für die Dampfreformierung notwendig ist, wird durch die partielle Oxidation des Kohlenwasserstoffs zur Verfügung gestellt. Der Prozess kann somit in einem autothermen Betriebsmodus gefahren werden. Prinzipiell ist ein höherer Wirkungsgrad möglich, da systembezogene Enthalpieverluste nur durch den warmen Produktgasstrom möglich sind. Besonders für den Gebrauch von Brennstoffzellensystemen als Fahrzeugantrieb mit Benzin oder Diesel als Kraftstoff scheint die autotherme Reformierung sehr viel versprechend. Dies ist durch die hohe Reaktionstemperatur (ca. 800°C) und eine gute Reaktionskinetik zu erklären.

**[0005]** Neben der Entwicklung von geeigneten Katalysatoren für die autotherme Reformierung von Mitteldestillaten hängt die Einsatzfähigkeit eines Reformers wesentlich davon ab, ob optimierte Betriebsbedingungen eingestellt werden können. Die Reformierung von flüssigen Kraftstoffen stellt hohe Ansprüche an die Vorbereitung der Edukte, bevor sie in die Reaktionszone des Reaktors, d. h. des Reformers eintreten.

**[0006]** Eine schlechte Qualität des Eduktgemisches hat regelmäßig eine negative Wirkung auf den Umsatz des Kraftstoffs, da sich in der Reaktionszone Ruß und so genannte "Hot Spots" bilden. Um diese Probleme zu vermeiden, ist es insbesondere wichtig, dass die  $O_2/C$ - und  $H_2O/C$ -Verhältnisse im Gemisch möglichst konstant bleiben und nicht schwanken. Teilweise bildet sich auch bereits bei der Herstellung des Eduktgemisches Ruß, der sich in der Mischkammer ablagert.

**[0007]** Die Mischkammer eines Reformers hat daher die folgenden Funktionen:

- Zuführung des Kraftstoffs
- Zerstäubung und Verdampfung des Kraftstoffs
- Gemischbildung (Homogenisierung der Kraftstoffkonzentration im Luft-Dampf-Strom)
- Homogenisierung der Durchflussverteilung (Fließgeschwindigkeitsprofil)

**[0008]** Aus der WO 00/10911 ist eine Mischkammer bekannt, in der Kraftstoff mit Hilfe von überhitztem Wasserdampf verdampft und in einem zweiten Bereich mit Luft durchmischt wird. Nachteilig ist mit einer solchen Mischkammer die Verdampfung der schwer siedenden Komponenten einiger flüssiger Kraftstoffe wie Diesel oder Heizöl sehr schwierig. Wird der Kraftstoff nur durch den direkten Wärmeaustausch mit einem heißen Gas verdampft, verdampfen zuerst nur die leicht siedenden Komponenten. Da dem Gas hierfür große Energiemengen entzogen werden, sinkt die Gastemperatur fortwährend ab, so dass sie nicht mehr ausreicht, um die schwer siedenden Komponenten zu verdampfen. Daher können komplexe Kraftstoffe auf diese Weise in der Regel nur unvollständig verdampft werden.

**[0009]** Die DE 198 60 308 A1 offenbart ein Verfahren zur Verwertung eines Brennstoffs, bei dem als Wärmequelle für die Verdampfung des flüssigen Kraftstoffs die so genannte „Kalte Flamme“ als genau definierte exotherme Reaktion genutzt wird. Nachteilig besteht bei diesem Verfahren die Gefahr der Rußbildung, falls eine Reaktion zwischen dem Oxidaten und dem flüssigen Kraftstoff zündet.

**[0010]** In der US 5,826,422 wird ein Teil des Kraftstoffs verbrannt, um die für die Verdampfung notwendige Wärme zu erzeugen. Nachteilig wird auch bei dieser klassischen Verbrennung Ruß gebildet.

## Aufgabe und Lösung

**[0011]** Aufgabe der Erfindung ist daher, ein Verfahren zur vollständigen Verdampfung eines komplexen flüssigen Kraftstoffs ohne Rußbildung, insbesondere zur Herstellung eines Kraftstoff-Oxidationsmittel-Gemisches für einen Reformer, zur Verfügung zu stellen. Das Verfahren sollte auch schwer siedende Bestandteile flüssiger Kraftstoffe verdampfen. Das Endprodukt des Verfahrens sollte eine solche Qualität aufweisen, dass auch bei seiner Umsetzung in einem nachgeschalteten Reformer kein Ruß entsteht. Aufgabe der Erfindung ist außerdem, eine Mischkammer zur Verfügung zu stellen, in der das Verfahren zur vollständigen Verdampfung eines Kraftstoffs, beispielsweise zur Herstellung des Kraftstoff-Oxidationsmittel-Gemisches, durchgeführt werden kann.

**[0012]** Diese Aufgaben werden erfindungsgemäß gelöst durch ein Verfahren gemäß Hauptanspruch

und eine Mischkammer gemäß Nebenanspruch. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich aus den jeweils darauf rückbezogenen Unteransprüchen.

#### Gegenstand der Erfindung

**[0013]** Im Rahmen der Erfindung wurde ein Verfahren gefunden, mit dem ein flüssiger Kraftstoff auch dann vollständig verdampft werden kann, wenn er schwer siedende Komponenten enthält. Beispielsweise enthalten Diesel und Benzin solche schwer siedenden Komponenten. Es wurde erkannt, dass sich der Kraftstoff, wie im Folgenden dargestellt, in zwei Stufen verdampfen lässt.

**[0014]** Welche Bestandteile leicht, beziehungsweise schwer siedend sind, wird üblicherweise bei jedem Kraftstoff anders definiert. Bei Diesel werden Komponenten als schwer siedend bezeichnet, wenn ihre Siedetemperatur höher als 350 bis 400°C liegt. Dementsprechend werden Komponenten mit einer Siedetemperatur bis etwa 300°C als leicht siedende Komponenten bezeichnet.

**[0015]** In der ersten Stufe wird der Kraftstoff durch Wärmekontakt mit einem primären Medium teilweise verdampft. Als primäres Medium ist jedes Medium geeignet, das eine höhere Temperatur aufweist als die Verdampfungstemperatur des Kraftstoffs und keine chemische Reaktion mit dem Kraftstoff eingeht.

**[0016]** Bei einem Gemisch aus mehreren Komponenten versteht man unter der Verdampfungstemperatur des Gemisches die mittlere Verdampfungstemperatur seiner Komponenten.

**[0017]** Vorzugsweise handelt es sich bei dem primären Medium um überhitzten Wasserdampf. Durch den direkten Wärmeaustausch mit dem primären Medium können in der Regel zwischen 50 und 99 Prozent, insbesondere zwischen 70 und 90 Prozent, der gesamten Kraftstoffmenge verdampft werden. Wenn es sich bei dem Kraftstoff um ein Mehrstoffgemisch handelt, wie beispielsweise Diesel oder Benzin, verdampfen in der ersten Stufe vor allem die leicht siedenden Komponenten des Kraftstoffs, im Falle von Diesel diejenigen Komponenten mit einer Siedetemperatur unterhalb 300°C. In der ersten Stufe findet keine chemische Reaktion zwischen dem Kraftstoff und dem primären Medium statt.

**[0018]** Nach der ersten Stufe wird dem Kraftstoff ein oxidierendes sekundäres Medium zugeführt, bei dem es sich insbesondere um Luft handeln kann. Das sekundäre Medium kann bis auf 400°C vorgewärmt werden, wird jedoch vorzugsweise mit Umgebungstemperatur zugeführt. Wird auf eine Vorwärmung verzichtet, hat das Gesamtsystem einen höheren Wirkungsgrad, und es wird außerdem vorteilhaft der für

die Vorwärmung notwendige Wärmetauscher eingespart. Wenn das sekundäre Medium auf das Gemisch von primärem Medium, bereits verdampftem Kraftstoffanteil und noch unverdampftem Kraftstoffanteil trifft, reagiert es exotherm mit dem bereits verdampften Kraftstoffanteil, der mit dem primären Medium vorgemischt ist. Dieser wird teilweise oxidiert.

**[0019]** Ob das sekundäre Medium vorgewärmt werden muss oder nicht, hängt von der Konstruktion der Anordnung ab, in der das Verfahren durchgeführt wird. Es müssen derartige Bedingungen herrschen, dass die teilweise Oxidation zündet. Insbesondere muss die Aktivierungsenergie für diese Oxidation zur Verfügung stehen.

**[0020]** Der verdampfte Kraftstoff oxidiert ausdrücklich nur teilweise und keinesfalls vollständig. Darunter ist eine Umsetzung des Kraftstoffs zu verstehen, die weniger Energie freisetzt als die totale Verbrennung der umgesetzten Kraftstoffmenge. Bei der teilweisen Oxidation entstehen als Reaktionsprodukte oxidierte und nicht oxidierte Kohlenwasserstoffe, wie beispielsweise Formaldehyd, Acetaldehyd oder Alkohole, sowie Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Diese Reaktionsprodukte können in der nachgeschalteten Reformierung noch zu einem wasserstoffreichen Gas umgesetzt werden. Reaktionsprodukte der totalen Verbrennung (Wasser und Kohlendioxid) können dagegen bei der weiteren Reformierung nicht mehr zu einem wasserstoffreichen Gas umgesetzt werden.

**[0021]** Um eine nur teilweise Oxidation des Kraftstoffs herbeizuführen, reicht es nicht aus, die Oxidation unter Sauerstoffmangel durchzuführen. Bei einer Oxidation unter Sauerstoffmangel wird nur ein Teil des Kraftstoffs umgesetzt, dieser Teil wird jedoch vollständig verbrannt. Für eine nur teilweise Oxidation muss dagegen der Reaktionsablauf der Oxidation, in unserem Fall bei Erreichen einer Temperatur zwischen etwa 500 und 600°C, unterbrochen werden. Dies kann über die Temperatur und das Strömungsprofil der Reaktionspartner sowie über die Dauer ihrer Wechselwirkung gesteuert werden.

**[0022]** Die noch unverdampften Kraftstoffanteile beteiligen sich an dieser Reaktion nicht. Dies ist dadurch bedingt, dass der bereits verdampfte Kraftstoff eine höhere Tendenz zur Zündung aufweist als der noch nicht verdampfte. Träfe das Oxidationsmittel nicht auf Kraftstoffdämpfe, würde der nicht verdampfte Kraftstoff zünden, wie beispielsweise in der DE 198 60 308 A1.

**[0023]** Durch die exotherme Reaktion entsteht Wärme, durch die in der zweiten Stufe des Verfahrens der noch unverdampfte Kraftstoffanteil vorteilhaft vollständig verdampft wird.

**[0024]** Handelt es sich bei dem Kraftstoff um ein

Mehrstoffgemisch, verdampfen hier die schwer siedenden Komponenten (bei Diesel beispielsweise die Komponenten mit einer Siedetemperatur oberhalb von 300°C).

**[0025]** Der entscheidende Vorteil gegenüber Verdampfungsverfahren nach dem Stand der Technik besteht darin, dass der Kraftstoff vollständig verdampft wird und zugleich eine Rußbildung vermieden wird. Dadurch entsteht ein Gemisch aus Kraftstoffdampf, Wasserdampf und Luft, das sich besonders für die Reformierung des Kraftstoffs zu einem wasserstoffreichen Gas eignet. Verdampfer, die das erfindungsgemäße Verfahren verwenden, müssen nicht regelmäßig von Ruß gereinigt werden, was in der Regel mit einer Betriebsunterbrechung einhergeht. Zugleich wird durch die hohe Qualität des Gemisches der Edukte Kraftstoffdampf, Wasserdampf und Luft auch eine Rußbildung bei seiner Umsetzung in einem nachgeschalteten Reformier vermieden. Gelänge Ruß als Abfallprodukt der Verdampfung in den Reformier oder entstünde er bei der Umsetzung des Kraftstoffdampfs im Katalysator, würde durch ihn die Aktivfläche des Katalysators blockiert. Die Nutzung der oben erwähnten exothermen Reaktion verbessert die Wärmebilanz des Systems gegenüber den Systemen, die zur Kraftstoffverdampfung ausschließlich Wärmetauscher benutzen. Gleichzeitig sinkt dadurch nicht die Wasserstoffausbeute wie in den Systemen, in denen ein Teil des Kraftstoffs verbrannt wird.

**[0026]** Die teilweise Oxidation des bereits verdampften Kraftstoffs verbraucht einen Teil der im Kraftstoff enthaltenen Energie. Dafür tragen auch die schwer siedenden Komponenten des Kraftstoffs zum am Ende des Verfahrens entstehenden Kraftstoffdampf bei. Nach dem Stand der Technik waren diese Komponenten nicht nutzbar, sondern mussten im Gegenteil sogar als Abfallprodukt aus dem Verdampfer abgeschieden werden. Da nunmehr auch diese Komponenten verdampft werden, enthält der mit dem erfindungsgemäßen Verfahren aus einer gegebenen Kraftstoffmenge hergestellte Dampf in der Regel genauso viel Kraftstoff wie bei einem Verzicht auf die zweite Stufe. Sofern unerwünschterweise ein Teil des Kraftstoffs in der zweiten Stufe vollständig verbrennt, gehen dabei höchstens bis zu 2,5 Prozent des Kraftstoffs verloren. In beiden Fällen bietet das erfindungsgemäße Verfahren den Vorteil, dass keinerlei Abfallprodukte entstehen, die aus dem Verdampfer abgeschieden werden müssen.

**[0027]** Vorteilhaft wird der Kraftstoff vor der ersten Stufe fein zerstäubt. Dies kann beispielsweise durch eine Zerstäubungsdüse oder einen Injektor bewirkt werden. Durch das Zerstäuben wird die Oberfläche des Kraftstoffs maximiert, was den Wärmeübertrag vom primären Medium auf den Kraftstoff verbessert.

**[0028]** Vorteilhaft weist das primäre Medium vor

dem Kontakt mit dem Kraftstoff eine Temperatur unterhalb von 700°C, insbesondere unterhalb von 500°C, auf. Dadurch wird bei gleicher Verdampfungsleistung Energie eingespart. Zugleich wird der Anlagenteil, in dem das Verfahren durchgeführt wird, thermisch weniger belastet.

**[0029]** Um intensive Durchmischung des Kraftstoffs mit dem primären Medium zu erzielen, sollte das primäre Medium möglichst nah zum Einspritzpunkt des Kraftstoffs zugeführt werden. Eine Rotation des Gasstroms ist für die Vermischung ebenso von Vorteil.

**[0030]** Vorteilhaft strömt das sekundäre Medium dem teilweise verdampften, mit dem primären Medium vermischten Kraftstoff entgegen. Dadurch wird die Durchmischung des Kraftstoffs mit dem sekundären Medium verbessert und seine Verteilung in der Vorrichtung, in der das Verfahren durchgeführt wird, homogenisiert. Dies stellt sicher, dass überall dort, wo noch unverdampfter Kraftstoff vorhanden ist, auch die partielle Oxidation stattfindet und die Wärme für die Verdampfung des unverbrannten Kraftstoffs bereitstellt.

**[0031]** Vorteilhaft beträgt die Temperatur der Reaktionsprodukte nach der partiellen Oxidation 800°C oder weniger, insbesondere 450°C oder weniger. Dadurch wird für die vollständige Verdampfung des Kraftstoffs nicht mehr Energie eingesetzt als nötig, und die Temperaturbelastung der Umgebung wird vermindert.

**[0032]** In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung erfolgen die erste Stufe der Verdampfung in einer primären Verdampfungszone und die zweite Stufe in einer davon räumlich beabstandeten sekundären Verdampfungszone. Dadurch wird gewährleistet, dass sich die beiden Stufen nicht gegenseitig stören.

**[0033]** In einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung wird der in einem ersten Bereich (Verdampfer) erfindungsgemäß verdampfte und teilweise oxidierte Kraftstoff in einem davon räumlich beabstandeten Bereich mit einem Oxidationsmittel durchmischt. Es wurde erkannt, dass sich durch diese Kombination von Maßnahmen auch aus minderwertigen Kraftstoffen ein homogenes Kraftstoff-Oxidationsmittel-Gemisch für einen Reformier herstellen lässt.

**[0034]** Unter minderwertigen Kraftstoffen sind solche Kraftstoffe zu verstehen, die einen hohen Anteil schwer siedender Komponenten enthalten.

**[0035]** Das Oxidationsmittel kann insbesondere mit dem für die Verdampfung verwendeten oxidierenden sekundären Medium identisch sein. Es kann aber auch einen anderen Sauerstoffgehalt aufweisen als

dieses sekundäre Medium. Über den Sauerstoffgehalt des Oxidationsmittels kann sichergestellt werden, dass Kraftstoff und Oxidationsmittel nach der Verdampfung nur noch mit dem Oxidationsmittel durchmischt werden und nicht mehr mit ihm reagieren.

**[0036]** Unter einem Bereich ist ein räumliches Gebiet zu verstehen, das insbesondere durch ein Reaktionsgefäß definiert sein kann.

**[0037]** Durchmischung mit dem Oxidationsmittel schließt ausdrücklich den Fall ein, dass der Kraftstoff sich nach seiner vollständigen Verdampfung noch im Verdampfer mit dem noch nicht reagierten Anteil des sekundären Mediums vermischt, ohne dass von außen weiteres Oxidationsmittel zugeführt wird.

**[0038]** Durch die räumliche Trennung von Verdampfung und Vermischung kann dem Kraftstoffdampf bei der Vermischung gerade so viel Sauerstoff zugeführt werden, dass sich Oxidationsmittel und verdampfter Kraftstoff zwar möglichst homogen durchmischen, jedoch nicht miteinander reagieren. Eine Reaktion zwischen Kraftstoff und Oxidationsmittel findet nur während der teilweisen Oxidation im Verdampfer statt, nicht aber im dem Verdampfer nachgeschalteten Bereich. Zusätzlich können weitere Parameter der Durchmischung im Hinblick auf ein letztendlich möglichst homogenes Kraftstoff-Oxidationsmittel-Gemisch optimiert werden, ohne die Verdampfung des Kraftstoffs zu stören.

**[0039]** Die Qualität eines Kraftstoff-Luft-Gemisches im Sinne einer Reformierbarkeit zu einem wasserstoffreichen Gas lässt sich an der Wasserstoffausbeute pro Einheit Primärbrennstoff messen. Diese Ausbeute wird durch die Einführung der zweiten Stufe in den Verdampfungsprozess höchstens um 2,5 Prozent, in der Regel jedoch überhaupt nicht, vermindert.

**[0040]** In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung wird von der dem Kraftstoff insgesamt zugeführten Stoffmenge an Sauerstoff ein Anteil zwischen 25 und 100 Prozent, vorzugsweise zwischen 35 und 50 Prozent, für die Verdampfung verwendet.

**[0041]** Unter der insgesamt zugeführten Stoffmenge an Sauerstoff ist die Summe der über das sekundäre Medium und über das Oxidationsmittel zugeführten Stoffmengen an Sauerstoff zu verstehen.

**[0042]** Bei dieser Sauerstoffverteilung wird der Kraftstoff besonders gut verdampft, während gleichzeitig nach dem Durchmischen ein besonders homogenes Kraftstoff-Oxidationsmittel-Gemisch entsteht. Dies führt zu einer vollständigen Umsetzung des Gemisches bei der Reformierung und unterbindet die Bildung kohlenstoffhaltiger Ablagerungen, die den

Katalysator deaktivieren würden.

**[0043]** Im Rahmen der Erfindung wurde eine Mischkammer gefunden, die einen Verdampfer und mindestens einen damit verbundenen zweiten Bereich aufweist. Diese Mischkammer ist für die vollständige Verdampfung eines Kraftstoffs nach dem erfindungsgemäßen Verfahren und hier insbesondere für die Herstellung eines Kraftstoff-Oxidationsmittel-Gemisches vorgesehen. Es wurde erkannt, dass bei Verwendung dieser Mischkammer die erfindungsgemäße Verdampfung und die erfindungsgemäße Durchmischung des Kraftstoffs mit dem Oxidationsmittel in besonders vorteilhafter Weise zusammenwirken.

**[0044]** Vorteilhaft ist das Oxidationsmittel mit dem bei der Verdampfung verwendeten sekundären Medium stofflich identisch. Es kann der Mischkammer dann zusammen mit dem sekundären Medium oder aber separat zugeführt werden. Im letzteren Fall lassen sich die zweite Stufe der Verdampfung und die Durchmischung unabhängig voneinander steuern, obwohl für beide Zwecke das gleiche Oxidationsmittel verwendet wird. Hierzu weist die Mischkammer vorteilhaft voneinander unabhängige Düsen für die Zufuhr des sekundären Mediums und für die Zufuhr des Oxidationsmittels auf.

**[0045]** Die Düsen können jeweils als Düsenkränze ausgebildet sein.

**[0046]** Für die Verdampfung bewirkt dies eine homogene Temperaturverteilung in der sekundären Verdampfungszone. Die Durchmischung wird durch diese Maßnahme homogener.

**[0047]** Vorteilhaft weist die Mischkammer zwischen dem Verdampfer und dem zweiten Bereich eine Verengung auf. In der Verengung kommt es zur Beschleunigung der Strömung und damit zur Intensivierung der Turbulenz, was für schnelle Vermischung vorteilhaft ist. Außerdem wird damit räumlich der Verdampferteil von dem zweiten Bereich abgetrennt.

#### Spezieller Beschreibungsteil

**[0048]** Nachfolgend wird der Gegenstand der Erfindung anhand von Figuren näher erläutert, ohne dass der Gegenstand der Erfindung dadurch beschränkt wird.

**[0049]** **Fig. 1** zeigt ein Ausführungsbeispiel für eine Vorrichtung (Verdampfer), mit der das Verfahren durchgeführt werden kann. Die Pfeile geben die typischen Strömungsprofile der Betriebsstoffe während des Betriebes an. Der Verdampfer, umfassend die primäre Verdampfungszone **1** und die sekundäre Verdampfungszone **2**, enthält Düsen für den flüssigen Kraftstoff **3** und für das primäre Medium **4**, die in unmittelbarer Nähe zueinander angeordnet sind. Da-

durch kann das primäre Medium **4** besonders intensiv mit dem Kraftstoff **3** durchmischt werden, wobei der größte Teil in der primären Verdampfungszone **1** verdampft. Die Düsen sind zudem so angeordnet, dass die Düse für den Kraftstoff **3** im Betrieb vom primären Medium **4** umströmt wird. Dies verhindert einen möglichen Tropfenniederschlag an der Düse für den Kraftstoff **3**, was zu einer Rußbildung und zu einer Verstopfung dieser Düse führen könnte.

**[0050]** Die Düsen für das sekundäre Medium **5** sind so angeordnet, dass das sekundäre Medium dem Kraftstoff entgegen strömt. Die Stoffaustrittsrichtung der Düsen und der Druck, mit dem das sekundäre Medium aus ihnen austritt, entscheiden darüber, wo sich die sekundäre Verdampfungszone **2** ausbildet. Der verdampfte Kraftstoff kann aus dem Verdampfer in einen Durchmischungsbereich **6** strömen, in dem er mit weiterem Oxidationsmittel **7** durchmischt wird, ohne mit diesem zu reagieren.

**[0051]** [Fig. 2](#) zeigt ein Ausführungsbeispiel für eine erfindungsgemäße Mischkammer. Die Pfeile geben die typischen Strömungsprofile der Betriebsmittel während des Betriebs an. Räumlich beabstandet von einem erfindungsgemäßen Verdampfer, umfassend die primäre Verdampfungszone **1** und die sekundäre Verdampfungszone **2**, als erstem Bereich befindet sich der zweite Bereich, in dem der verdampfte Kraftstoff homogen mit Oxidationsmittel durchmischt wird (Durchmischungsbereich **6**). Zwischen dem ersten und dem zweiten Bereich sind ein Düsenkranz zur Versorgung des ersten Bereichs mit sekundärem Medium **5** und ein weiterer Düsenkranz zur Versorgung des zweiten Bereichs mit Oxidationsmittel **7** vorgesehen. Am rechten Ende des zweiten Bereichs ist der Katalysator **9** eines autothermen Reformers eingezeichnet, dem das in der Mischkammer hergestellte Kraftstoff-Oxidationsmittel-Gemisch **8** typischerweise zugeführt wird.

**[0052]** Bei einer konkreten Ausführung des Verfahrens zur Verdampfung wurde Aral Ultimate Diesel verwendet, der ein  $O_2/C$ -Verhältnis von 0,47 und ein  $H_2O/C$ -Verhältnis von 1,90 aufweist. Die nachgeschaltete Reformierung liefert bei einer Verdampfung des Kraftstoffs nur mit der ersten Stufe ein trockenes Produktgas mit 35,7 Volumenprozent Wasserstoff. Bei der erfindungsgemäßen zweistufigen Verdampfung ist die Wasserstoffkonzentration im Produktgas bei einer Messgenauigkeit von 0,5 Volumenprozent nicht messbar vermindert.

**[0053]** Bei einer weiteren konkreten Ausführung des Verfahrens wird eine Mischkammer mit nachgeschaltetem Katalysator verwendet.

**[0054]** Diese Mischkammer weist einen inneren Durchmesser von 53 mm und eine Länge von 150 mm von der Einspritzdüse bis zum Katalysator auf.

Als Oxidationsmittel wird Luft eingedüst, wobei hierfür je 1 mm Durchmesser **30** Bohrungen angebracht sind. Die Gesamtanordnung aus Mischkammer und Katalysator liefert genügend Brenngas für eine Brennstoffzelle der 5-kW-Leistungsklasse. Sie verbraucht 1,3 kg/h Kraftstoff (Diesel oder Kerosin), 5,8 kg/h Luft und 3,1 kg/h Wasser.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Verdampfen eines flüssigen Kraftstoffs mit den Schritten:

- der Kraftstoff wird durch Wärmekontakt mit einem primären Medium teilweise verdampft (erste Stufe);
- dem Kraftstoff wird ein oxidierendes sekundäres Medium zugeführt;
- der bereits verdampfte Kraftstoffanteil wird teilweise oxidiert;
- der noch unverdampfte Kraftstoffanteil wird verdampft (zweite Stufe).

2. Verfahren nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch überhitzten Wasserdampf als primäres Medium.

3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 2, dadurch gekennzeichnet, dass in der ersten Stufe zwischen 50 und 99 Prozent, insbesondere zwischen 70 und 90 Prozent, der gesamten Kraftstoffmenge verdampft werden.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, gekennzeichnet durch Luft als sekundäres Medium.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Kraftstoff vor der ersten Stufe fein zerstäubt wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass das primäre Medium vor dem Kontakt mit dem Kraftstoff eine Temperatur unterhalb von 700°C, insbesondere unterhalb von 500°C, aufweist.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass das sekundäre Medium dem Kraftstoff entgegen strömt.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur der Reaktionsprodukte nach der partiellen Oxidation 800°C oder weniger, insbesondere 450°C oder weniger, beträgt.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Stufe der Verdampfung in einer primären Verdampfungszone erfolgt und dass die zweite Stufe der Verdampfung in einer hiervon räumlich beabstandeten sekundären Verdampfungszone erfolgt.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Kraftstoff

- in einem ersten Bereich (Verdampfer) verdampft und teilweise oxidiert wird und
- in einem vom ersten Bereich räumlich beabstandeten zweiten Bereich mit einem Oxidationsmittel durchmischt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass von der dem Kraftstoff insgesamt zugeführten Stoffmenge an Sauerstoff ein Anteil zwischen 25 und 100 Prozent, vorzugsweise zwischen 35 und 50 Prozent, für die Verdampfung verwendet wird.

12. Mischkammer, umfassend einen Verdampfer und mindestens einen damit verbundenen zweiten Bereich, zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 10 bis 11.

13. Mischkammer nach Anspruch 12, gekennzeichnet durch ein mit dem sekundären Medium stofflich identisches Oxidationsmittel.

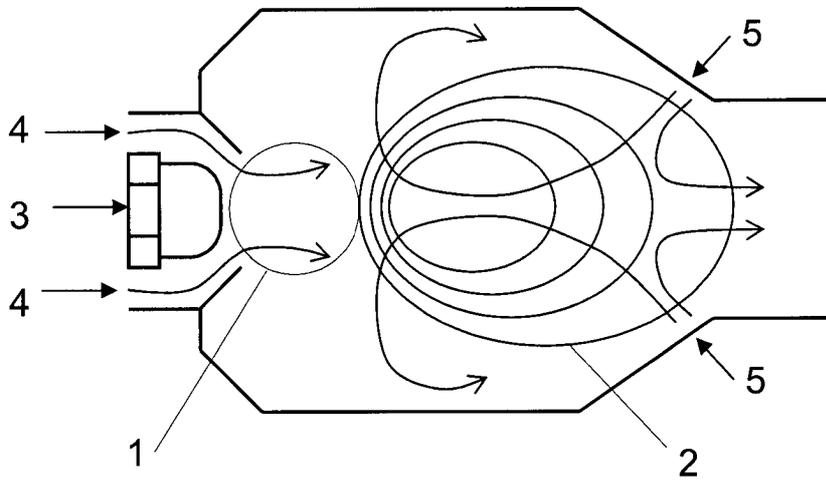
14. Mischkammer nach Anspruch 13, gekennzeichnet durch voneinander unabhängige Düsen für die Zufuhr des sekundären Mediums und die Zufuhr des Oxidationsmittels.

15. Mischkammer nach Anspruch 14, gekennzeichnet durch als jeweils als Düsenkränze ausgebildete Düsen.

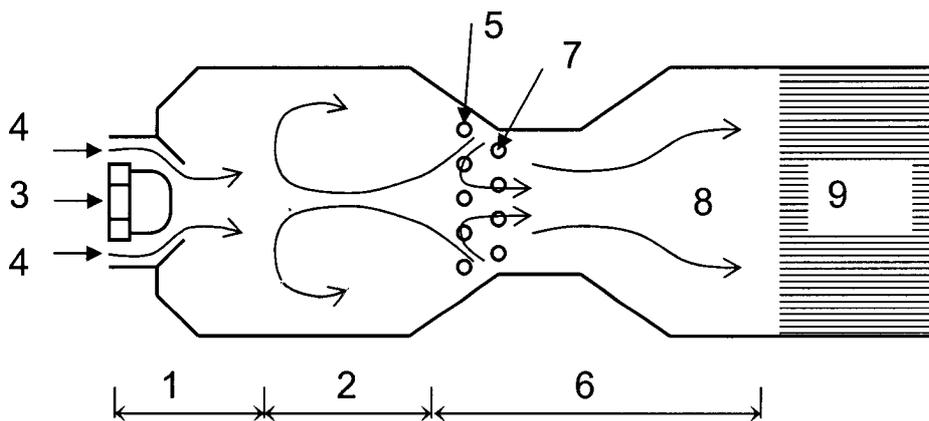
16. Mischkammer nach einem der Ansprüche 12 bis 15, gekennzeichnet durch eine Verengung zwischen dem Verdampfer und dem zweiten Bereich.

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



Figur 1



Figur 2