(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2008 048 854 B4** 2012.08.02

(12) # Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2008 048 854.2**
(22) Anmeldetag: **25.09.2008**
(43) Offenlegungstag: **08.04.2010**
(45) Veröffentlichungstag der Patenterteilung: **02.08.2012**

(51) Int Cl.: ***F01N 9/00*** (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten(§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Umicore AG & Co. KG, 63457, Hanau, DE**

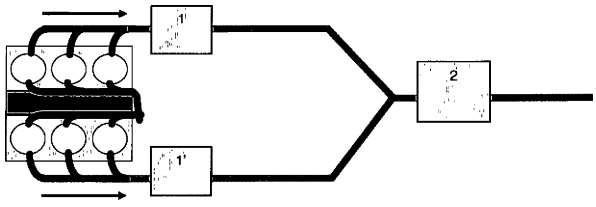
(72) Erfinder:
**Hoyer, Rüdiger, 63450, Hanau, DE; Franoschek, Stefan, 41334, Nettetal, DE; Eckhoff, Stephan, 63755, Alzenau, DE**

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

| | | |
|---|---|---|
| **DE** | **195 43 219** | **C1** |
| **DE** | **698 04 371** | **T2** |
| **US** | **2006 / 0 168 948** | **A1** |

(54) Bezeichnung: **Regelungsstrategie für ein Katalysatorkonzept zur Abgasnachbehandlung mit mehreren Stickoxid-Speicherkatalysatoren**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Behandlung von Abgasen eines überwiegend mager betriebenen Verbrennungsmotors mit einer Abgasreinigungsvorrichtung aufweisend einen vorzugsweise motornahen ersten Stickoxid-Speicherkatalysator und abströmseitig dazu im gleichen Abgasstrang einen oder mehrere weitere Stickoxid-Speicherkatalysatoren, welche jeweils räumlich getrennt zueinander angeordnet sind, und die Initiierung der Fettphase zur Regeneration der Stickoxid-Speicherkatalysatoren durch Erreichen von vorgegebenen Stickoxid-Schwellenwerten hinter den einzelnen Katalysatoren erfolgt,
dadurch gekennzeichnet, dass
a) der Abbruch der Fettphase zur Regeneration der Stickoxid-Speicherkatalysatoren dann eingeleitet wird, wenn hinter dem Katalysator, hinter dem der vorgegebene Stickoxid-Schwellenwerten als erstes überschritten wurde, ein bestimmter Lambda-Wert unterschritten wird, wobei
b) die jeweiligen vorgegebenen Stickoxid-Schwellenwerte in Strömungsrichtung immer niedriger gewählt werden, und wobei
c) ein Stickoxid-Speicherkatalysator der eine vorgegebene Stickoxidspeicheraktivität nach der Regeneration nicht erreicht an der Regelung dann nicht mehr teilnimmt.



## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Regelungsstrategie für ein Katalysatorkonzept zur Abgasnachbehandlung. Das Katalysatorkonzept zeichnet sich dadurch aus, dass im Abgasstrang eines Fahrzeugs mindestens zwei Stickoxid-Speicherkatalysatoren eingesetzt werden, die räumlich voneinander getrennt im Abgasstrang angeordnet sind und wobei der erste Stickoxid-Speicherkatalysator vorzugsweise motornah verbaut wird.

**[0002]** Mager betriebene Verbrennungsmotoren, so genannte Magermotoren, werden zur Verminderung des Kraftstoffverbrauchs überwiegend und insbesondere im Teillastbetrieb mit überstöchiometrischem Luft/Kraftstoff-Verhältnis also mageren betrieben. Ein mageres Luft/Kraftstoffgemisch enthält demnach eine höhere Sauerstoffkonzentration als für die vollständige Verbrennung des Kraftstoffes benötigt wird. Im entsprechenden Abgas liegen dann die oxidierenden Komponenten Sauerstoff ($O_2$), Stickoxide (NOx) im Überschuss gegenüber reduzierenden Abgaskomponenten wie Kohlenmonoxid (CO), Wasserstoff ($H_2$) und Kohlenwasserstoffen (HC) vor. Mageres Abgas enthält gewöhnlich 3 bis 15 Vol.-% Sauerstoff.

**[0003]** Zu den Magermotoren gehören Dieselmotoren und mager betriebene Ottomotoren. Erst in den letzten Jahren wurden Dieselmotoren entwickelt, die für kurze Dauer auch mit fetten Luft/Kraftstoff-Gemischen betrieben werden können. Innerhalb bestimmter Betriebsphasen, wie z. B. dem Volllastbetrieb oder dem Kaltstart, erfolgt bei mager betriebenen Ottomotoren eine stöchiometrische oder sogar unterstöchiometrische, das heißt fette, Luft/Kraftstoffaufbereitung.

**[0004]** Im Rahmen dieser Erfindung werden zu den überwiegend mager betriebenen Motoren neben den Dieselmotoren und den Ottomotoren mit Benzindirekteinspritzung und Schichtladebetrieb auch konventionelle Ottomotoren mit weitestgehend homogener Gemischaufbereitung gerechnet, die mit Luftzahlen bis etwa 1,4 – das heißt mager, betrieben werden können. Speziell entwickelte Magermotoren mit Benzin-Direkteinspritzung können mit Luftzahlen bis 2,5 und neueste Magermotoren sogar mit Luftzahlen über 5 betrieben werden. Bei Dieselfahrzeugen reicht die Luftzahl bis an die 25 heran.

**[0005]** Zur Beschreibung der Betriebsart eines Verbrennungsmotors wird häufig statt des Luft/Kraftstoff-Verhältnisses die Luftzahl λ verwendet. Dabei handelt es sich um das auf stöchiometrische Bedingungen normierte Luft/Kraftstoff-Verhältnis. Dementsprechend beschreibt die Luftzahl λ = 1 ein stöchiometrisch zusammengesetztes Luft/Kraftstoff-Gemisch. Bei Magermotoren liegt die Luftzahl überwiegend oder vollständig bei Werten über 1.

**[0006]** Wegen des hohen Sauerstoffgehaltes im Abgas von Magermotoren können die bei der Verbrennung entstandenen Stickoxide (NOx) nicht wie bei stöchiometrisch betriebenen Ottomotoren mit Hilfe von Dreiweg-Katalysatoren kontinuierlich unter gleichzeitiger Oxidation von Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid zu Stickstoff reduziert werden. Deren katalytische Reduktion gelingt nur in einem stöchiometrischen bis fetten Abgasgemisch. Um Stickoxide im mageren Abgas kontinuierlich reduzieren zu können, werden spezielle Katalysatoren verwendet, wie beispielsweise HC-DeNOx-Katalysatoren oder SCR-Katalysatoren. Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der Stickoxide in mageren Abgasen ist durch die Verwendung von Stickoxid-Speicherkatalysatoren gegeben. Diese, diskontinuierlich betriebenen Stickoxid-Speicherkatalysatoren, ermöglichen die Speicherung von Stickoxiden in magerem Abgas und reduzieren die gespeicherten Stickoxide unter stöchiometrischen bis fetten Abgasbedingungen (SAE-Schrift SAE 950809). Um die zukünftigen Abgasnormen einzuhalten, werden bereits Kraftfahrzeuge mit mager betriebenen Benzin- und Dieselmotoren mit NOx-Speicherkatalysatoren (NSK) ausgerüstet.

**[0007]** Um die Zwischenspeicherung der Stickstoffoxide zu erreichen, werden auf geeigneten Trägern, z. B. einem inerten Wabenkörper aus Keramik oder Metall, Edelmetalle als katalytisch aktive Komponenten und NOx-Speichermaterialien aufgebracht. Das Stickoxid-Speichermaterial wiederum besteht aus der eigentlichen Stickoxid-Speicherkomponente, die auf einem Trägermaterial in hochdisperser Form abgeschieden sein kann. Als Speicherkomponenten werden vorwiegend die basischen Oxide der Alkalimetalle, der Erdalkalimetalle und der Seltenerdmetalle, insbesondere aber Bariumoxid, eingesetzt, welche mit den Stickoxiden zu den entsprechenden Stickoxid-Verbindungen, z. B. Nitraten reagieren. Als katalytisch aktive Komponenten werden gewöhnlich die Edelmetalle der Platingruppe verwendet, die in der Regel gemeinsam mit der Speicherkomponente auf dem Trägermaterial abgeschieden werden. Als Trägermaterial wird überwiegend aktives, hochoberflächiges Aluminiumoxid eingesetzt.

**[0008]** Die katalytisch aktiven Komponenten können jedoch auch auf einem separaten Trägermaterial wie zum Beispiel aktivem Aluminiumoxid aufgebracht sein.

**[0009]** Stickoxide setzen sich definitionsgemäß aus Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid zusammen, wobei im Abgas eines Magermotors je nach Betriebszustand des Motors die Stickoxide zu etwa 50 bis 90% als Stickstoffmonoxid vorliegen. In der mageren, das heißt sauerstoffreichen, Atmosphäre werden neben der HC- und CO-Komponente die Stickstoffoxide unter der katalytischen Wirkung des vorhande-

nen Edelmetalls im NOx-Speicherkatalysator aufoxidiert, unter Ausbildung von Nitraten wie beispielsweise Bariumnitrat im Katalysator absorbiert und somit aus dem Abgasstrom entfernt. Ist die Aufnahmekapazität des NOx-Speicherkatalysators erschöpft, so wird seitens der Motorelektronik kurzzeitig ein fettes, reduzierendes Abgasgemisch eingestellt (Fettbetrieb normalerweise circa zwei bis zehn Sekunden). Durch das regelmäßige kurzzeitige „Anfetten" laufen die Reaktionen in der entgegengesetzten Richtung ab, wodurch die gespeicherten Stickoxide wieder in den Abgasstrom abgegeben und durch die in der fetten Atmosphäre vorhandenen, reduzierenden Komponenten wie HC – unvollständig verbrannte Kohlenwasserstoffe – oder CO vorzugsweise zu $N_2$ reduziert werden. Dadurch wird der Katalysator für den nächsten Speicherzyklus regeneriert. Durch dieses Vorgehen ist es auch möglich, die Schadstoffemissionen sparsamer Magermotoren zu minimieren und die gesetzlich vorgeschriebenen Emissions-Grenzwerte einzuhalten. Die Aufnahmekapazität des Stickoxid-Speicherkatalysators kann durch einen NOx-Sensor überwacht werden. Die Arbeitsweise von Stickoxid-Speicherkatalysatoren wird ausführlich in der SAE-Schrift SAE 950809 beschrieben. Entsprechende NOx-Sensoren können der Schrift Autoabgaskatalysatoren, Grundlagen – Herstellung – Entwicklung – Recycling – Ökologie, 2005, Expert Verlag, 2. Auflage entnommen werden.

**[0010]** Aktuell erhältliche Speicherkatalysatoren können NOx vorteilhaft nur in einem Temperaturbereich von 250 bis 450°C speichern. Die höchsten Speicherraten werden in einem Temperaturfenster von 300–400°C erzielt. Mit steigender Temperatur setzt eine thermische Desorption der Stickoxide ein. Üblicherweise werden daher Stickoxid-Speicherkatalysatoren im kühleren Unterbodenbereich von Kraftfahrzeugen mit Magermotoren eingesetzt, da hier die Abgastemperaturen im normalen Betrieb des Fahrzeugs eine optimale Nutzung des Stickoxid-Speicherkatalysators erlauben.

**[0011]** Der Schwerpunkt heutiger Forschung liegt insbesondere in der Verkürzung der Kaltstartphase, da ein Großteil der Gesamtschadstoffemission innerhalb der ersten drei Minuten nach Motorstart emittiert werden. In dieser Zeit ist der Katalysator aufgrund des Unterschreitens seiner Betriebstemperatur fast funktionslos. Die Kaltstartphase kann u. a. durch folgende Maßnahmen verkürzt werden:

- Lufteinblasung vor Katalysator bei Fettbetrieb (Erzeugung einer Flamme, die den Katalysator aufheizt),
- elektrisch beheizter Katalysator,
- Spätzündung
- möglichst motornahe Katalysatormontage (zum Beispiel direkt hinter dem Abgaskrümmer).

**[0012]** Die möglichst motornahe Montage des Speicherkatalysators würde einen frühzeitigen Betrieb des Katalysators nach Kaltstart ermöglichen, birgt jedoch die Nachteile, die mit einer starken Erwärmung des Katalysators in dieser Position einhergehen. Gerade bei Ottomotoren können im motornahen Bereich im Volllastbetrieb etwa 1000°C im Katalysator erreicht werden. Bei Dieselmotoren werden üblicher Weise Temperaturen von maximal 800°C erreicht, beispielsweise bei der Regeneration eines nachgeschalteten Dieselpartikelfilters. Aus diesem Grunde muss ein in Motornähe platzierter Stickoxid-Speicherkatalysator thermisch höher belastbar sein als ein im Unterboden des Fahrzeuges platzierter Katalysator. Moderne magerbetriebenen Ottomotoren haben den Stickoxid-Speicherkatalysator im Unterboden platziert (siehe: C. Schwarz, et. al., MTZ 05/2007 Jahrgang 68, S. 332ff.), wo dieser mit Temperaturen von maximal 830°C belastet wird (siehe: A. Waltner et. al., Die zweite Generation der Benzindirekteinspritzung, 15. Aachener Kolloquium 2006).

**[0013]** Für den Fall eines stöchiometrisch betriebenen Verbrennungsmotors beschreibt die WO 9617671 eine Abgasreinigungsvorrichtung aus einem motornahen Katalysator und einem Unterbodenkatalysator, welche eine verbesserte Umsetzung aller drei Schadstoffe, nämlich Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid und Stickoxide, schon während der Kaltstartphase ermöglicht. Der motornahe Katalysator ist während des normalen Betriebs des Verbrennungsmotors sehr hohen Temperaturen bis zu 1100°C ausgesetzt und muss daher eine besonders temperaturstabile Zusammensetzung aufweisen. Gemäß der WO 9617671 enthält der motornahe Katalysator Palladium auf einem Aluminiumoxid. Zur Stabilisierung des Aluminiumoxids gegenüber den hohen Temperaturen enthält der Katalysator zusätzlich wenigstens ein Oxid der Erdalkalimetalle Strontiumoxid, Calciumoxid und Bariumoxid. Diese Abgasreinigungsvorrichtung ist für die Zwecke von stöchiometrisch betriebenen Verbrennungsmotoren optimiert, für die Entfernung der Stickoxide aus dem Abgas von mager betriebenen Verbrennungsmotoren ist sie jedoch nicht geeignet.

**[0014]** Aus der US20060168948 ist ein System zur Abgasreinigung bekannt, welches aus zwei hintereinander geschalteten NOx-Speicherkatalysatoren besteht. Dabei sollte der erste Katalysator möglichst wenig bis gar kein Alkali- oder Erdalkalioxid aufweisen, um eine hohe Desorptionsrate des Stickoxids während der Regeneration bei niedrigen Temperaturen zu gewährleisten. Gleichfalls besteht eine geringere Anfälligkeit des ersten Katalysators gegenüber Schwefelvergiftung. Gleichfalls wird ein Verfahren zur Entschwefelung offenbart. Eine spezielle Regelungsstratgie für die Katalysatoren wird nicht vorgestellt.

**[0015]** Die DE19918756 lehrt eine Anordnung zur Reinigung eines Abgases einer Verbrennungskraftmaschine, insbesondere von Kraftfahrzeugen, mit einem in einem Abgaskanal angeordneten Katalysatorsystem zur Reduzierung des Stickoxid(NOx)-Anteils des Abgases und ein Verfahren zum Betrieb einer solchen Anordnung. Es ist vorgesehen, dass das Katalysatorsystem im Strömungszug des Abgases einen ersten NOx-Speicherkatalysator und beabstandet zu diesem einen zweiten NOx-Speicherkatalysator umfasst. Eine motornahe Anordnung des NOx-Speicherkatalysators ist nicht erwünscht. Die Regelung zur Regenerationseinleitung der beiden Stickoxid-Speicherkatalysatoren verläuft temperaturabhängig oder in Abhängigkeit des Speichergrades der Katalysatoren, wobei keine Aussage über den Abbruch des Fettbetriebes getroffen wird.

**[0016]** In der EP1152140 wird eine Abgasreinigungsvorrichtung beschrieben, bei der zwei getrennte NOx-Speicherkatalysatoren zum Einsatz kommen. Der erste Katalysator befindet sich dabei gegenüber dem zweiten Katalysator in einem Bereich der Abgasanlage, in dem höhere Temperaturen vorherrschen. Die Basizität des ersten Katalysators ist dabei gegenüber der des zweiten stromabwärts sitzenden Katalysators erhöht, so dass eine verbesserte NOx-Speicheraktivität selbst bei hohen Temperaturen erreicht werden kann. Vor dem motornahen NOx-Speicherkatalysator kann sich ein Drei-Wege-Katalysator (TWC), ggf. zusammen in einem Canning mit dem NOx-Speicherkatalysator befinden. Über eine Regenerationsstrategie wird in dieser Schrift nichts ausgesagt.

**[0017]** Die WO2006069652 hingegen schlägt ein Verfahren zur Überwachung der Stickoxid-Speicherfähigkeit eines Stickoxid-Speicherkatalysatorsystems vor, welches aus einem motornahen Startkatalysator und einem Hauptkatalysator besteht, wobei beide Katalysatoren als Stickoxid-Speicherkatalysatoren ausgebildet sind. Bei einem solchen Katalysatorsystem ist der Startkatalysator im Betrieb naturgemäß besonders hohen Temperaturen ausgesetzt und unterliegt daher einer schnellen Alterung. Seine Stickoxid-Speicherfähigkeit nimmt daher schneller als die des Hauptkatalysators ab. Es ist daher erforderlich, den Alterungszustand des Startkatalysators häufiger zu untersuchen, um rechtzeitig eine Fehlfunktion des Katalysators feststellen zu können. Gemäß der Ausführung dieser Erfindung soll der Startkatalysator zusätzlich eine Sauerstoff-Speicherfunktion aufweisen. Im Normalbetrieb wird das Katalysatorsystem von Zeit zu Zeit durch kurzzeitiges Umschalten des Motors von Magerbetrieb in den Fettbetrieb regeneriert, wenn die Auswertung des Stickoxid-Schlupfes hinter dem Katalysatorsystem ein Regenerationskriterium übersteigt, um die während des Magerlaufs des Motors abgespeicherten Stickoxide wieder zu desorbieren und zu unschädlichen Komponenten umzusetzen. Zur Bestimmung des Umschaltpunktes dient der Stickoxid-Sensor hinter dem Hauptkatalysator. Als Kriterium für das Umschalten vom Magerbetrieb in den Fettbetrieb kann die vom Stickoxid-Sensor gemessene Stickoxid-Konzentration im Abgas herangezogen werden. Übersteigt sie einen vorgegebenen Grenzwert, so wird die Regeneration eingeleitet.

**[0018]** Es ist davon auszugehen, dass das Abgas von modernen Magermotoren in Zukunft immer kälter wird. Dies ist begründet durch die immer effizienteren Brennverfahren moderner Motoren und bedingt durch das Bestreben, die $CO_2$ Emissionen und somit den Krattstoftverbrauch weitergehend zu reduzieren. Zusätzlich werden durch Maßnahmen wie Turboaufladung weitere Wärmesenken in das Abgassystem eingeführt. In der Literatur (siehe: C. Schwarz, et. al., MTZ 05/2007 Jahrgang 68, S. 332ff. und: A. Waltner et. al., Die zweite Generation der Benzindirekteinspritzung, 15. Aachener Kolloquium 2006) ist beschrieben, dass bereits bei den in Serie eingeführten Fahrzeugen mit Ottomotoren mit Benzindirekteinspritzung und Schichtladung der zweiten Generation sehr niedrige Abgastemperaturen während des Fahrzyklus im Unterbodenkatalysator vorherrschen, so dass Heizmaßnahmen den Katalysator auf Betriebstemperatur bringen müssen, was den Kraftstoffverbrauch steigen lässt. In den in der oben genannten Literatur abgebildeten Temperaturverläufen von motornahem Drei-Wege-Katalysator und im Unterboden angeordneten Stickoxid-Speicherkatalysator über den „Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEDC) ” ist zu erkennen, dass der motomahe Drei-Wege-Katalysator bei einer etwa 50–200°C wärmeren Temperatur betrieben wird als der im Unterboden angeordnete Katalysator. Ferner befindet sich der motomahe Katalysator wesentlich schneller auf Betriebstemperatur von über 250°C als der im Unterboden angeordnete Katalysator. Diese Tatsache legt den Schluss nahe, den Stickoxid-Speicherkatalysator in Motornähe anzuordnen. Da die Betriebstemperatur des motornahen Katalysators oft über der optimalen Betriebstemperatur des Stickoxid-Speicherkatalysators liegt, ist es nötig, einen weiteren Stickoxid-Speicherkatalysator im Unterboden anzuordnen. Ferner ist der Bauraum in motornaher Position üblicherweise stark eingeschränkt, so dass ein alleiniger motornaher Stickoxid-Speicherkatalysator nicht ausreichend groß dimensioniert werden kann.

**[0019]** Aus der DE19543219 ist ein Verfahren bekannt, welches die Regelung eines Systems bestehend aus motornahem Stickoxid-Speicherkatalysator und einem im Unterboden verbauten Stickoxid-Speicherkatalysator beschreibt. Durch die motomahe und motorferne Anordnung ist gewährleistet, dass beide Katalysatoren in unterachiedlichen Temperaturbereichen arbeiten. Hier soll die Adsorption, Resorption und Reduktion von NOx optimal geführt werden. Da-

zu wird eine der entstandenen NOx-Menge entsprechende Menge an HC nachgespritzt. Die Katalysatoren sollen so abgestimmt werden, dass die Funktion der Desorption (motornaher Katalysator) und gleichzeitige Reduktion (motorferner Katalysator) ergänzend wirken. Dies ist allerdings ausschließlich dann möglich, wenn die Katalysatoren in einer Art DeNOx-Reaktion betrieben werden.

**[0020]** Tatsache ist, dass es bisher im Stand der Technik keine ökologisch und ökonomisch vorteilhafte Lösung gibt, wie eine Abgasreinigungsanlage mit vorzugsweise motornahem und weiteren ggf. im Unterboden angebrachten Stickoxid-Speicherkatalysatoren sinnvoll durch Fett/Magerwechsel des Abgases betrieben werden kann, um den Anforderungen eines kalten Abgases bzw. der Kaltstartproblematik und dem Gesamtschadstoffausstoß sowie der thermischen Beanspruchung gerecht zu werden.

**[0021]** Aufgabe der vorliegenden Erfindung war es daher, eine Regelungsstrategie zu konzipieren, mit der eine Abgasreinigungsanlage mit mindestens zwei Stickoxid-Speicherkatalysator sinnvoll im Fett/Magerbetrieb betreiben werden kann. Die Regelungsstrategie sollte es dabei erlauben, allgemein Anlagen mit einem vorzugsweise motornahen und einem oder mehreren ggf. im Unterboden verbauten Stickoxid-Speicherkatalysatoren vom ökonomischen wie ökologischen Standpunkt aus vorteilhaft betreiben zu können und gleichzeitig den Anforderungen an die ständig steigenden Abgasgrenzwerte einhalten zu können.

**[0022]** Diese und weitere nicht näher genannte sich jedoch aus dem Stand der Technik in nahe liegender Weise ergebenden Aufgaben werden durch ein mit den Merkmalen des gegenständlichen Anspruchs 1 beschriebenes Verfahren erfolgreich gelöst. Bevorzugte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens befinden sich in den von Anspruch 1 abhängigen Unteransprüchen.

**[0023]** Dadurch, dass in einem Verfahren zur Behandlung von Abgasen eines überwiegend mager betriebenen Verbrennungsmotors mit einer Abgasreinigungsvorrichtung aufweisend einen vorzugsweise motornahen ersten Stickoxid-Speicherkatalysator und abströmseitig dazu im gleichen Abgasstrang einen oder mehrere weitere Stickoxid-Speicherkatalysatoren, welche jeweils räumlich getrennt zueinander angeordnet sind, wobei die Initiierung der Fettphase zur Regeneration der Stickoxid-Speicherkatalysatoren durch Erreichen von vorgegebenen Stickoxid-Schwellenwerten hinter den einzelnen Katalysatoren erfolgt, und

a) der Abbruch der Fettphase zur Regeneration der Stickoxid-Speicherkatalysatoren dann eingeleitet wird, wenn hinter dem Katalysator, hinter dem durch das Erreichen der vorgegebenen Stickoxid-Schwellenwerte, die aktuelle Fettphase initiiert wurde, ein bestimmter Lambda-Wert unterschritten wird, wobei

b) die jeweiligen vorgegebenen Stickoxid-Schwellenwerte in Strömungsrichtung immer niedriger gewählt werden, und wobei

c) ein Stickoxid-Speicherkatalysator der eine vorgegebene Stickoxidspeicheraktivität nach der Regeneration nicht erreicht, an der Regelung dann nicht mehr teilnimmt, gelangt man sehr einfach und dennoch vorteilhaft und unerwartet zur Lösung der beschriebenen Aufgaben. Insbesondere kann mit dieser Vorrichtung und dem erfindungsgemäßen Betreiben derselben erreicht werden, dass sowohl in den kalten Phasen des Betriebsbereichs eines Kraftfahrzeugs (Stau, Stadtfahrt, Startphase) als auch in Betriebsbereichen bei hohen Temperaturen mit überwiegend magerem Abgas eine deutliche Verringerung des Schadstoffausstoßes erreicht wird. Die erfindungsgemäße Regelungsstrategie erlaubt es darüber hinaus, flexibel auf wechselnde Betriebszustände des Motors zu reagieren und trotzdem eine ausreichende Sicherheit für das Einhalten der Stickoxid Abgasgrenzwerte zu bieten.

**[0024]** Dem Fachmann sind die hier einzusetzenden Stickoxid-Speicherkatalysatoren hinlänglich bekannt. Ein Stickoxid-Speicherkatalysator enthält in der Regel die eigentlichen katalytisch aktiven Komponenten (z. B. Pd, Pt, Rh), das Speichermaterial (z. B. BaO) und einen Träger (z. B. Aluminiumoxid, $CeO_2$) [EP-A-1 317 953, WO 2005/092481]. Die Materialien werden zusammen oder getrennt voneinander nach den, dem Fachmann bekannten Verfahren auf monolithischen, inerten 4- oder 6-eckigen Wabenkörpern aus Keramik (z. B. Cordierit) oder Metall in Form einer Beschichtung aufgebracht. Die Wabenkörper besitzen in einem engen Raster über ihren Querschnitt angeordnete, parallel zur Längsachse der Wabenkörper liegende Strömungskanäle für das zu reinigende Abgas. Die Zelldichte (Anzahl der Strömungskanäle pro Querschnittsfläche der Wabenkörper) liegt gewöhnlich zwischen 1800 und 100 cpsi, bevorzugt 900–300 cpsi, besonders bevorzugt um ca. 400 cpsi. Am häufigsten werden heute noch Wabenkörper mit Zelldichten von 62 $cm^{-2}$ eingesetzt. Die katalytisch aktive Beschichtung wird auf den Wandflächen der die Strömungskanäle begrenzenden Trennwände in Konzentrationen von 50 bis 450 Gramm pro Liter (g/l) Volumen der Wabenkörper, bevorzugt 200–400 g/l und ganz besonders bevorzugt 250–350 g/l abgeschieden.

**[0025]** Die Stickoxid-Speicherkatalysatoren sollten räumlich getrennt voneinander angebracht sein. Räumlich getrennt bedeutet im Rahmen der Erfindung, dass zwischen den einzelnen Stickoxid-Speicherkatalysatoren ein gewisser, nicht einen Stickoxid-Speicherkatalysator aufweisender Bereich liegt

und diese damit voneinander beabstandet sind. Nicht als zwei einzelne Stickoxid-Speicherkatalysatoren werden daher solche betrachtet, die direkt hintereinander in einem Konvertergehäuse angeordnet sind. Als Abstand zwischen den einzelnen Stickoxid-Speicherkatalysatoren wird ein Bereich von 20 bis 200 cm, bevorzugt 40 bis 150 cm und ganz bevorzugt 60 bis 120 cm als ausreichend und vorteilhaft angesehen.

**[0026]** Mögliche erfindungsgemäße Katalysatoranordnungen sind in Fig. 1–Fig. 5 beispielhaft aufgeführt.

**[0027]** Die Initiierung der Fettphase erfolgt beim Erreichen von vorgegebenen Stickoxid-Schwellenwerten hinter den einzelnen Katalysatoren. Dieser Wert wird z. B. dann erreicht, wenn aus irgendeinem Grund die Stickoxid-Speicheraktivität eines Stickoxid-Speicherkatalysators nachlässt und ein erhöhter Stickoxidschlupf auftritt.

**[0028]** Unter Stickoxid-Schwellenwert, welcher im Rahmen der Erfindung die Einleitung des Fettbetriebes steuert, wird die Höhe einer Stickoxidemission [Masse] verstanden. Auf Basis welcher Parameter diese Emissions-Schwellenwerte/-Grenzwerte bestimmt oder berechnet werden, kann der Fachmann festlegen. Als hierfür bevorzugt zu verwendende Parameter können folgende Größen ausgewählt aus der Gruppe Stickoxid-Massenstrom, Stickoxidkonzentration, kumulierter Stickoxid-Massenstrom, relative Stickoxidkonzentration, relativer kumulierter Stickoxid-Massenstrom, relativer Stickoxid-Massenstrom, etc. herangezogen werden. Z. B. kann die (ggf. kumulierte) Stickoxid-Konzentration direkt durch einen Stickoxidsensor nach jedem einzelnen Stickoxid-Speicherkatalysator gemessen oder durch Stickoxid-Emissionskennfelder in einer elektronischen Steuereinheit modelliert werden. Diese Steuereinheit kann aus den modellierten Konzentrationen ebenfalls die Stickoxidmassenströme berechnen.

**[0029]** Bei der Verwendung eines Stickoxidsensors ist die Stickoxidkonzentration unmittelbar die Messgröße; durch Multiplikation mit dem Abgasmassenstroms und dem Dichteverhältnis von Stickoxid zu Abgas kann der Stickoxid-Massenstrom einfach berechnet werden. Durch Aufsummierung des Produkts aus aktuellen Stickoxid-Massenstroms und aktueller Abtastrate ergibt sich der kumulierte Stickoxid-Massenstrom. Wird einer der obigen Werte auf einen weiteren Wert bezogen, so erhält man einen Relativwert. Durch den Bezug auf die während des Aufsummierungszeitraums zurückgelegte Wegstecke ergibt sich ein Stickoxid-Wert in Gramm pro Kilometer (g/km) und beim Bezug des kumulierten Stickoxid-Massenstroms auf den kumulierten Stickoxid-Massenstroms vor Stickoxid-Speicherkatalysators einen Stickoxid-Wert als Umsatz in Gramm pro Gramm. Auf Basis dieser Größe lassen sich die Stickoxid-Schwellenwerte entsprechend bestimmen.

**[0030]** Ergänzend können die Temperaturen nach den einzelnen Stickoxid-Speicherkatalysatoren gemessen oder modelliert werden und zur Einleitung des Fettbetriebs herangezogen werden. Vor dem Überschreiten einer bestimmten Grenztemperatur, bei der der jeweilige Stickoxid-Speicherkatalysator eine erhöhte Desorptionsgeschwindigkeit für Stickoxide aufweist, was üblicherweise bei Temperaturen von über 500°C der Fall ist, kann es beispielsweise ebenfalls sinnvoll sein, eine Regeneration einzuleiten (siehe weiter unten).

**[0031]** Wie schon angedeutet kann es in der Magerphase bei dem vorgestellten Abgasnachbehandlungssystem je nach Auslegung des Speichermaterials des einzelnen Stickoxid-Speicherkatalysators, seines Beladungszustandes, seines Alterungsgrades, seiner Schwefelvergiftung, seiner Betriebstemperatur und/oder des Massenstromes an Stickoxiden – kurz bei Erschöpfung der Speicheraktivität – zu essenziellen Durchbrüchen von Stickoxiden durch das Katalysatormaterial kommen. Um auch solche Betriebszustände sicher abfangen zu können, erfolgt in dem vorliegenden Verfahren die Speicherung der Stickoxide sequenziell in hintereinander gelegenen und beabstandet angeordneten Stickoxid-Speicherkatalysatoren (Fig. 9). Die Initiierung der Regeneration der einzelnen Katalysatoren erfolgt dabei durch Überschreiten von Stickoxid-Schwellenwerten hinter den einzelnen Katalysatoren (s. o.). Diese Schwellenwerte können im Rahmen der Erfindung flexibel durch die Motorsteuerung den jeweiligen Betriebszustände des Motors und Katalysatorauslegungen angepasst werden. Bedingung ist, dass die jeweiligen vorgegebenen Stickoxid-Schwellenwerte in Strömungsrichtung immer niedriger gewählt werden. Das Überschreiten der Schwellenwerte dient demnach als Regelungskriterium zur Initiierung der Regeneration („Fettphase"). Dieses Regelungskriterium kann hinter jedem der eingesetzten Katalysatoren eintrete, so dass die Schwellenwerte eine Art Kennlinie entlang der Katalysatoranordnungen defirieren. Diese kann linear, hyperbolisch, negativ sigmoidal, negativ exponential, 1/x-Form oder reziprok logarithmisch aufgebaut sein. Vorteilhaft ist, wenn sich benachbarte Schwellenwerte finden, die sich um den Faktor 1,02 bis 50 bevorzugt 1,05 bis 30, besonders bevorzugt 1, 2 bis 20 ganz besonders bevorzugt 1,5 bis 15 unterscheiden. Besonders vorteilhaft ist, wenn das System sich diesbezüglich selbst so einrichtet, dass mit dem vorliegenden Katalysator-Setup und den vorhandenen Ist-Bedingungen ein vom ökologischen und ökonomischen Standpunkt aus betrachtetes Optimum im Hinblick auf das zu erreichende Endergebnis (Einhaltung der Abgasgrenzwerte bei möglichst geringem Kraftstoffverbrauch) erzielt wird.

**[0032]** Der Abbruch der Regenerationsphase erfolgt, wenn hinter dem Katalysator, hinter dem durch das Erreichen der vorgegebenen Stickoxid-Schwellenwerte die aktuelle Fettphase initiiert wurde, ein bestimmter Lambda-Wert unterschritten wird. Wie dieser ausgestaltet ist, kann der Fachmann anhand seines allgemeinen Fachwissens bzw. die Motorsteuerung im Rahmen der Optimierung des vorgestellten Abgasnachbehandlungssystems (Einhaltung der Abgasgrenzwerte bei möglichst geringem Kraftstoffverbrauch) ermitteln.

**[0033]** Der Lambda-Wert ist wie eingangs schon beschrieben eine Maßzahl für das Verhältnis von Sauerstoff zu reduzierenden Komponenten im Abgas, insbesondere dem HC- und CO-Anteil. Bevorzugt wird der Lambda-Wert zwischen 1,1 und 0,8 angenommen, mehr bevorzugt ein Wert zwischen 1,05 und 0,9 und ganz besonders bevorzugt ein Wert um 1. Werden die hier vorgestellten Grenzwerte hinsichtlich des Luft/Kraftstoff-Verhältnisses hinter dem Katalysator, hinter dem durch das Erreichen der vorgegebenen Stickoxid-Schwellenwerten die aktuelle Fettphase initiiert wurde, unterschritten, wird der Abbruch der Fettphase zur Regeneration der Stickoxid-Speicherkatalysatoren eingeleitet und der Motor somit wieder auf den normalen Magerbetrieb umgestellt.

**[0034]** Die Stickoxid-Speicheraktivität eines eingesetzten Katalysators sollte im Rahmen der Ausführung der Erfindung nach der Regeneration wieder einen vorgegebenen Wert aufweisen. Denn im Rahmen der Erfindung wird als Stickoxid-Speicherkatalysator nur ein solcher betrachtet, der unter den Ist-Bedingungen mindestens eine vorgegebene Stickoxid-Speicheraktivität nach der Regeneration erreicht. Dieses ist von mannigfachen Einflussparametern abhängig. Die Grenze ist dort zu wählen, wo ein vom ökologischen und ökonomischen Standpunkt aus betrachtetes Optimum im Hinblick auf das zu erreichende Endergebnis (Einhaltung der Abgasgrenzwerte bei möglichst geringem Krattstoffverbrauch) erzielt wird. Als Parameter, welche die Stickoxid-Speicheraktivität insbesondere herabsetzen, zählen solche Effekte ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus zu hoher Temperatur, thermische Alterung (**Fig. 8**), Vergiftung z. B. durch Schwefel oder andere Vergiftungselemente oder Kombinationen davon. Ein Katalysator, der den vorgegebenen Wert nach der Regeneration nicht erreicht bzw. aufweist, nimmt an dem beschriebenen Regelkreis dann insofern nicht mehr teil, als dass er bzgl. der Initiierung der Fettphase als auch deren Abbruch als nicht vorhanden angesehen wird.

**[0035]** Als vorgegebene Stickoxid-Speicheraktivität wird ein Wert verstanden, bei dem das Betreiben des jeweiligen Stickoxid-Speicherkatalysators durch Mager/Fett Wechsel im Hinblick auf die zu lösende Aufgabe gerade noch sinnvoll ist. Ist die Stickoxid-Speicheraktivität zu gering, so würde sofort nach der Regeneration erneut ein hoher Stickoxidschlupf hinter dem Katalysator messbar sein, was eine erneute Regeneration starten würde und somit den Kraftstoffverbrauch in die Höhe treiben würde, ohne dass die Speicheraktivität der nachfolgenden Katalysatoren ausgenutzt werden würde. Die Stickoxid-Speicheraktivität kann reversibel oder irreversibel herabgesetzt sein. Starke thermische Alterung oder Vergiftung des Katalysators durch anorganische Vergiftungselemente aus der Ölasche oder anorganischen Kraftstoffbestandteilen führt zu einer irreversiblen Verringerung der Stickoxid-Speicheraktivität. Ein irreversibel stark deaktivierter Stickoxid-Speicherkatalysator wird definitionsgemäß nicht mehr am Regelkreis teilnehmen. Handelt es sich jedoch um eine reversible Verringerung der Stickoxid-Speicheraktivität, wenn zum Beispiel der Stickoxid-Speicherkatalysator außerhalb seines optimalen Temperaturfensters zur Stickoxideinspeicherung betrieben wird oder wenn der Katalysator durch Schwefel reversibel vergiftet wurde, so wird der Stickoxid-Speicherkatalysator nach Wiederherstellung der jeweiligen Stickoxid-Speicheraktivität erneut in den Regelkreis mit aufgenommen.

**[0036]** Zur Erläuterung des eben genannten Aspekts sei erwähnt, dass z. B. der motornahe erste Speicherkatalysator bei einer Erwärmung über 550°C keine oder allenfalls wenig Stickoxide einspeichern kann. Eine Regeneration dieses Katalysators führt hier nicht zum Erreichen eines ausreichenden Wertes für die Speicheraktivität. In diesem Fall gilt dann im Rahmen der Erfindung und bzgl. der Regelungsstrategie der diesem Speicherkatalysator folgende als erster Stickoxid-Speicherkatalysator. Dieser ist dann naturgemäß nicht mehr der motornächste Katalysator. Sofern dann hinter diesem das Kriterium für die Initiierung der Regeneration erreicht wird, kommt es zu einer Regeneration Ober diesen und den vorhergehenden Katalysator. Entsprechendes gilt auch für die diesem folgenden Katalysator bzw. Katalysatoren.

**[0037]** Wie gesagt, ist eine Grundvoraussetzung bei dem erfindungsgemäßen Verfahren allerdings, dass die angesprochene Kennlinie für die Stickoxid-Schwellenwerte so ausgestaltet ist, dass letztere in Strömungsrichtung immer niedriger gewählt werden. Vorzugsweise sollten diese so angesetzt werden, dass der Stickoxid-Schwellenwert hinter dem letzten Katalysator in der Mehrheit der Betriebszustände des Motors unterhalb der relevanten gesetzlichen Vorgabe liegt. Besonders vorteilhaft ist, wenn die Kennlinie so ausgestaltet ist, dass in den von den einschlägigen Vorschriften vorgegebenen Testzyklen (NEDC, FTP-75, US06, 10–15 Mode Test, etc.) der Stickoxid-Schwellenwert hinter dem letzten Katalysator unterhalb der relevanten gesetzlichen Vorgabe liegt. Äußerst bevorzugt sollte der Stickoxid-Schwellenwerte

hinter dem letzten Katalysator immer unterhalb der relevanten gesetzlichen Vorgabe liegen.

**[0038]** Diese eben angesprochene vorteilhafte Ausführungsform kann auch dadurch unterstützt werden, dass weitere, insbesondere mehr als zwei Stickoxid-Speicherkatalysatoren im Abgasstrang angeordnet sind. Dies bedeutet demnach, dass die Anzahl der Stickoxid-Speicherkatalysatoren so bemessen wird, dass der Stickoxid-Schwellenwert hinter dem letzten Katalysator in der Mehrheit der Betriebszustände des Motors unterhalb der relevanten gesetzlichen Vorgabe liegt. Besonders vorteilhaft ist, wenn die Anzahl der vorhandenen Katalysatoren so bemessen wird, dass in den von den einschlägigen Vorschriften vorgegebenen Fahrzyklen (s. o.) der Stickoxid-Schwellenwert hinter dem letzten Katalysator unterhalb der relevanten gesetzlichen Vorgabe liegt. Äußerst bevorzugt sollte der Stickoxid-Schwellenwerte hinter dem letzten Katalysator immer unterhalb der relevanten gesetzlichen Vorgabe liegen.

**[0039]** Zwischen den eben genannten Punkten – der Ausgestaltung der Kennlinie und der Anzahl an Stickoxid-Speicherkatalysatoren sowie dem Stickoxid-Speichermaterial – besteht ein wechselseitiger Zusammenhang. Es ist dem Fachmann klar, dass er die Parameter des Systems so einstellen sollte, dass vom ökologischen und ökonomischen Standpunkt aus gesehen das optimale Ergebnis (Einhaltung der Abgasgrenzwerte bei möglichst geringem Kraftstoffverbrauch) erreicht wird.

**[0040]** Prinzipiell kann das erfindungsgemäße Verfahren mit mindestens zwei Stickoxid-Speicherkatalysatoren betrieben werden. Wie beschrieben, bietet es sich jedoch an, für eine bessere Kontrolle der bei der Verbrennung des Abgases entstehenden Schadstoffe, vorzugsweise drei oder vier oder mehr Stickoxid-Speicherkatalysatoren hintereinander im Abgasstrang des Fahrzeugs unterzubringen. Unter Umständen reichen nämlich zwei Stickoxid-Speicherkatalysatoren für eine optimale Reinigung der Abgase nicht aus. Zum einen ist bei dem erfindungsgemäßen Verfahren eine bevorzugte Ausführung, dass der erste Stickoxid-Speicherkatalysator motornah angeordnet ist. Wie eingangs schon angedeutet, ist dieser damit unter Umständen sehr hohen Temperaturen ausgesetzt. Die Temperaturen können wert über der Grenze liegen, ab der eine Desorption von Stickstoffdioxiden aus dem Speichermaterial bevorzugt ist. Es ist auch möglich, dass sich die Stickoxid-Speicheraktivität dieses motornah platzierten Katalysators aufgrund thermischer Beanspruchung dauerhaft verschlechtert (Fig. 8). Zum anderen kann es der Fall sein, dass sich eine Deaktivierung des Katalysators durch „Vergiftung" mit Schwefeloxiden (z. B. US20060168948) einstellt. In solchen Fällen ist das Vorhandensein von mehr als zwei separaten (räumlich getrennten) Stickoxid-Speicherkatalysatoren sicher von Vorteil.

**[0041]** In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform kann sich nach den einzelnen räumlich getrennten Stickoxid-Speicherkatalysatoren ein SCR-Katalysator befinden (Fig. 3 und Fig. 4). Derartige SCR-Katalysatoren sind dem Fachmann wohl bekannt (WO2007/137675, US4961917, DE10335785). Unter SCR-Katalysatoren werden Katalysatoren verstanden, die unter mageren Abgasbedingungen Stickoxide unter Zusatz von Reduktionsmitteln, wie z. B. Ammoniak, selektiv zu Stickstoff umsetzen. Diese Katalysatoren enthalten saure Oxide und können Ammoniak speichern. Typische SCR-Katalysatoren enthalten zum Beispiel Vanadiumoxid und/oder Wolframoxid auf Titanoxid. Alternativ kommen auch Zeolithe in Frage, die als H-Form eingesetzt werden oder mit Metallen wie Kupfer und/oder Eisen ausgetauscht sein können. Gewöhnlich enthalten solche Katalysatoren keine katalytisch aktiven Platinmetalle, da diese Metalle den Ammoniak im mageren Abgas zu Stickoxiden oxidieren würden. Bevorzugt werden für die erfindungsgemäße Abgasreinigungsanlage SCR-Katalysatoren eingesetzt, die Zeolithe enthalten. Zeolithe weisen ein besonders großes Speichervermögen für Ammoniak sowie für Kohlenwasserstoffe auf. Sie sind daher hervorragend geeignet für die Speicherung und Umsetzung dieser Komponenten des Abgases mit Stickoxiden.

**[0042]** In einer ganz bevorzugten Ausführungsform ergibt sich eine Modifizierung des Abbruchs der "Fettphase" in einem wie eben geschilderten Fall dahingehend, dass der Abbruch der Fettphase zur Regeneration der Stickoxid-Speicherkatalysatoren erst dann eingeleitet wird, wenn hinter dem jeweiligen SCR-Katalysator, ein wie oben weiter ausgeführter (bestimmter) Lambda-Wert unterschritten wird. Hierdurch wird einerseits erreicht, dass das während der Fettphase über dem motornahen Stickoxid-Speicherkatalysator gebildete Ammoniak im entsprechend ausgestatteten SCR Katalysator gespeichert, und in der anschließenden Magerphase zur selektiven Stickoxidreduktion über dem SCR-Katalysator verwendet werden kann. Ferner wird dadurch verhindert, dass das gebildete Ammoniak durch den nachfolgenden Stickoxid-Speicherkatalysator wieder zu Stickoxiden aufoxidiert und eingespeichert wird, was die Speicherkapazität der weiteren ggf. im Unterboden befindlichen Stickoxid-Speicherkatalysatoren schneller herabsetzen würde. Es ist vorteilhaft den SCR-Katalysator ebenfalls im Unterboden zu positionieren, da seine Ammoniakspeicherfähigkeit bei niedrigen Temperaturen (< 350°C) höher ist als bei hohen Temperaturen und die maximale thermische Belastung in diesem Bereich ebenfalls geringer ist.

**[0043]** Ebenfalls sinnvoll ist die Anordnung von SCR-Katalysatoren hinter einem oder mehreren der

weiteren, ggf. im Unterboden verbauten Stickoxid-Speicherkatalysatoren, da dort die thermische Belastung noch geringer ist und durch diese Anordnung die direkte Ammoniakemission in die Atmosphäre vermieden wird. Allerdings sind hier die gebildeten Mengen an Ammoniak wesentlich geringer als bei der Positionierung des SCR-Katalysators vor den ggf. im Unterboden sitzenden weiteren Stickoxid-Speicherkatalysatoren, wodurch deren Beitrag zum Gesamtumsatz der Stickoxide bei dieser Anordnung geringer ist.

**[0044]** Heutzutage verkaufte Kraftstoffe sind nicht völlig schwefelfrei. Fahrzeuge mit einem Stickoxid-Speicherkatalysator müssen mit einem Kraftstoff mit einem Schwefelgehalt von unter 10 ppm betrieben werden. Denn bei deren Verbrennung entstehen gerade auch im mageren Betrieb Schwefeloxide, welche mit dem Abgas aus dem Motor herausgeführt werden. Es liegt in der Natur der Sache, dass vorteilhafte Stickoxid-Speicherkatalysatoren auch hervorragende Schwefeloxid, insbesondere $SO_2$- und $SO_3$-Speicher sind. Je nach Schwefelgehalt des Kraftstoffs müssen daher die Stickoxid-Speicherkatalysatoren von Zeit zu Zeit nicht nur vom Stickoxid sondern auch vom gespeicherten Schwefeloxid befreit werden (US20060168948). Im Speicherkatalysator kommt es ansonsten zu einer ungewollten Einlagerung des Schwefels und dadurch zu einer Vergiftung des Speichermaterials durch Sulfatbildung. Aufgrund der stärkeren Affinität des Speichermaterials zu Schwefeloxiden erfolgt die Regeneration hier allerdings bei höheren Temperaturen als beim Stickoxid. Um den Schwefel herauszulösen und wieder zu Schwefeldioxid umzuwandeln ($SO_2$), muss die Abgastemperatur daher entsprechend erhöht werden. Der motornahe Stickoxid-Speicherkatalysator hat den Vorteil, dass er als Schwefelfalle dienen kann und durch die Motornähe häufig genug auf entsprechende Temperaturen erwärmt wird. So ist es von Vorteil, wenn die Entschwefelung eingeleitet wird, wenn die Temperatur des motornahen Stickoxid-Speicherkatalysators > 600°C, vorzugsweise größer 650°C und besonders bevorzugt größer 700°C beträgt. Die Entschwefelung kann im Prinzip nach dem gleichen Mechanismus wie die Regeneration als Stickoxid-Speicherkatalysator durch „Anfetten" erreicht werden. Die oben angegebenen Maßnahmen können daher mit Rücksicht auf die angegebenen Temperaturen unter der Berücksichtigung hier übernommen werden, dass eine Entschwefelung zeitlich länger dauert als die Regeneration von Stickoxiden.

**[0045]** In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform wird bei einer derartigen Regeneration des motornahen Stickoxid-Speicherkatalysators das entstehende schwefelhaltige Abgas an einem oder mehreren folgenden Stickoxid-Speicherkatalysator(en) mittels Bypassleitung vorbeigeführt, um diese nicht zusätzlich mit Schwefeloxiden zu belasten. Von Zeit zu Zeit müssen jedoch auch diese vom Schwefel befreit werden. Dies erfolgt vorzugsweise im Zusammenhang mit der Entschwefelung eines Teil- oder des Gesamtsystems. Diese wird dann vorteilhafter Weise eingeleitet, wenn die Temperatur der folgenden, ggf. im Unterboden verbauten Stickoxid-Speicherkatalysators > 550°C, weiter bevorzugt größer 600°C und ganz besonders bevorzugt größer 650°C beträgt.

**[0046]** Dem Fachmann ist bekannt, welche Motorsteuerung hier eingesetzt werden kann, um die erfindungsgemäße Regelungsstrategie der Abgasreinigungsanlage durchführen zu können (Electronic Engine Controls, 2008, ISBN Number: 978-0-7680-2001-4). Gleichfalls sind ihm Sensoren bekannt, die zum Messen der Regenerationskriterien (NOx-Schwellerwert und Lambda-Wert) herangezogen werden können (Christian Hagelüken, Autoabgaskatalysatoren – Grundlagen – Herstellung – Entwicklung – Recycling – Ökologie, Expert-Verlag, 2. Auflage, S. 188ff., insbesondere S. 206ff).

**[0047]** Es sei jedoch angemerkt, dass in einer besonders vorteilhaften Ausführungsform das Anbringen von Sensoren hinter dem Stickoxid-Speicherkatalysators bzw. SCR-Katalysator auch entfallen kann. Hier werden dann die jeweiligen Regenerationskriterien (Stickoxid-Schwellenwert und Fettdurchbruch) auf Basis von Daten der Motorcharakteristik und durch Computerberechnungen erhalten. Der Verzicht auf die Sensoren ist vor dem Hintergrund der Kosten und der Wartung eines solchen Systems besonders vorteilhaft.

**[0048]** Gegenüber dem Stand der Technik grenzt sich die vorliegende Erfindung durch ihre besondere Art und Weise der Regeneration der einzelnen Stickoxid-Speicherkatalysatoren, welche im Abgasstrang eines mager betriebenen Verbrennungsmotors auftreten, ab.

**[0049]** Die WO200669652 beschreibt demgegenüber, dass normalerweise eine Regeneration des Gesamtsystems durchgeführt wird, wobei als Kriterium für das Umschalten vom Magerbetrieb in den Fettbetrieb die Stickoxid-Konzentration im Abgas nach dem Hauptkatalysator herangezogen wird. Um die Speicherkapazität des motornahen Stickoxid-Speicherkatalysators bestimmen zu können, wird diese getrennt von derjenigen des Hauptkatalysators bestimmt. Erfindungsgemäß wird hierzu das gesamte Katalysatorsystem wie auch in den anderen Magerlaufphasen bis zum Erreichen des Regenerationskriteriums mit Stickoxiden beladen. Statt einer Totalregeneration wird dann jedoch nur eine Teilregeneration vorgenommen, die nur aus einer Regeneration des Startkatalysators besteht, wobei die Zeit zur Regeneration des Startkatalysators als Maß für dessen noch verbliebene Stickoxidspeicherkapazität

herangezogen wird. Hiergegen grenzt sich die vorliegende Erfindung vorteilhaft dadurch ab, dass eine Regeneration über den motornahen Stickoxid-Speicherkatalysators stets erfolgt, sobald insbesondere seine Speicherkapazität erschöpft ist, dass bedeutet sobald der Stickoxid-Schwellenwert überschritten wird bei ausreichender Stickoxid-Speicheraktivität. Die Regeneration über den jeweils nachfolgenden Stickoxid-Speicherkatalysator erfolgt nur, wenn insbesondere dessen Speicherkapazität erschöpft ist, z. B. wenn die vorangehenden Stickoxid-Speicherkatalysatoren in ihrer Ist-Aktivität – z. B. aus den eingangs genannten Gründen – unter einen bestimmten Wert fallen.

**[0050]** Beispielhaft bedeutet dies für ein System aus motornahem und Unterboden-Stickoxid-Speicherkatalysator, dass in Bereichen, in denen der motornahe Stickoxid-Speicherkatalysator eine ausreichende Aktivität aufweist, die Motorsteuerung den Motor vom Magerbetrieb in den Fettbetrieb (s. vorne) umschaltet, sobald ein Regenerationskriterium (Stickoxid-Schwellenwert) hinter dem motornahen Stickoxid-Speicherkatalysator überschritten wird. Der Fettbetrieb wird sodann wieder abgestellt, sofern hinter dem motornahen Stickoxid-Speicherkatalysator ein Fettdurchbruch registriert wird. Nun ist der regenerierte motornahe Stickoxid-Speicherkatalysator für eine erneute Speicherung von Stickoxiden vorbereitet. Weist der motornahe Stickoxid-Speicherkatalysator aufgrund zu hoher Temperatur dann eine zu geringe Aktivität auf, kommt der weitere ggf. im Unterboden verbaute Stickoxid-Speicherkatalysator auf entsprechend hohe Aktivitäten. Ggf. erfolgt die Regelung der Regeneration der Abgasreinigungsanlage ausschließlich über den Unterboden-Stickoxid-Speicherkatalysator. Sobald hinter dem Unterboden-Stickoxid-Speicherkatalysator das Regenerationskriterium (Stickoxid-Schwellenwert) erfüllt ist, wird durch die Motorelektronik angewiesen, in den Fettbetrieb umzuschalten. Dieser wird solange aufrechterhalten, bis ein bestimmter Lambdawert hinter dem Unterboden-Stickoxid-Speicherkatalysator unterschritten wird. Anschließend wird der Motor im normalen Magerbetrieb weiterbetrieben, bis erneut das Regenerationskriterium hinter dem Unterboden-Stickoxid-Speicherkatalysator auftritt oder das Regenerationskriterium hinter dem motornahen Stickoxid-Speicherkatalysator erreicht wird, wenn dessen Aktivität wieder ausreichend zur Verfügung steht. Entsprechend ist dies für drei und mehr räumlich zueinander getrennt angeordneten Stickoxid-Speicherkatalysatoren zu verstehen.

**[0051]** Durch diese Betriebsweise kommt es insgesamt zu geringeren Reduktionsmitteldurchbrüchen am Ende des Gesamtabgassystems, da die soweit vorhandenen abströmseitigen Stickoxid-Speicherkatalysatoren den bis zum Stopp der Fettphase auftretenden geringen Reduktionsmitteldurchbruch über den die Fettphase initiierenden Stickoxid-Speicherkatalysators leicht aufoxidieren können. Ebenso verhält es sich mit dem Schlupf von möglicherweise während der Fettphase gebildetem $NH_3$ durch den die Fettphase initiierenden Stickoxid-Speicherkatalysator am Ende der Fettphase. Über dem die Fettphase initiierenden Stickoxid-Speicherkatalysator gebildetes $NH_3$ wird an den weiteren Stickoxid-Speicherkatalysatoren zu Stickstoffdioxid aufoxidiert und direkt wieder eingespeichert, so dass es nicht in die Atmosphäre gelangen kann. Ferner werden bei der Regeneration des motornahen Stickoxid-Speicherkatalysators die Stickoxid-Desorptionspeaks, die zu Beginn des Regenerationsvorganges allgemein auftreten, von den weitern Stickoxid-Speicherkatalysatoren abgefangen und werden nicht, wie sonst üblich, emittiert, was die Stickoxidemission weiter senkt.

**[0052]** Der Kraftstoffverbrauch sollte sich trotz der insgesamt häufigeren Regenerationen bei der in dieser Erfindung vorgeschlagenen Regenerationsstrategie positiv von der sonst üblichen Regenerationsstrategie unterschieden, da die Regenerationen im Mittel wesentlich kürzer ausfallen, als die sonst üblichen Regeneration über das Gesamtabgassystem. Im zuletzt genannten Fall wird bei jeder Regeneration neben den gespeicherten Stickoxiden auch ggf. vorhandene Sauerstoffspeicher im Gesamtabgassystem (inklusive z. B. in einem Dreiwegekatalysator) reduziert, während im vorliegenden Fall immer nur der Sauerstoffspeicher bis zum jeweils die Fettphase initiierenden Stickoxid-Speicherkatalysators reduziert wird.

**[0053]** Ein im Unterbodenbereich angeordneter Stickoxid-Speicherkatalysator wird in der Regel optimal bei Fahrzeuggeschwindigkeiten von 50–100 km/h genutzt, wo im Allgemeinen Temperaturen von 250–450°C im Katalysator vorherrschen. Bei niedrigeren Abgastemperaturen z. B. bei Fahrzeuggeschwindigkeiten unterhalb 50 km/h oder während des Kaltstarts ist es vorteilhaft, einen weiteren Stickoxid-Speicherkatalysator in Motornähe zu platzieren, welcher im Mittel höheren Temperaturen ausgesetzt ist und somit seinen optimalen Beitrag zur NOx-Reduktion während der kältern Betriebspunkte des Motors leisten kann (**Fig. 6** und **Fig. 7**). Einen weiteren Stickoxid-Speicherkatalysator abstromseitig des im Unterboden befindlichem Stickoxid-Speicherkatalysators zu platzieren, z. B. in der Position des Endschalldämpfers, ist u. a. dann besonders vorteilhaft, wenn auch bei hohen Abgastemperaturen noch eine hohe Stickoxidumsatzrate erforderlich ist. Dies wäre dann zum Beispiel bei Fahrzeuggeschwindigkeiten über etwa 100 km/h gegeben. In diesem Fall wäre wahrscheinlich auch die Temperatur des im Unterboden befindlichen Stickoxid-Speicherkatalysators schon zu hoch, weshalb dann der nach weiter hinten platzierte Stickoxid-Speicherkatalysator zum Einsatz kommen würde. Dies war aus dem

Stand der Technik so in nahe liegender Weise nicht abzuleiten.

**[0054]** Sofern im Text von Unterboden die Rede ist, so bezieht sich dies im Zusammenhang mit der vorliegenden Erfindung auf einen Bereich im Fahrzeug, bei dem der Katalysator im Abstand von 0,2–2,5 m, mehr bevorzugt 0,5–2 m und ganz besonders bevorzugt 0,7–1,5 m nach Ende des ersten motornahen Katalysators angebracht ist.

**[0055]** Als motornah wird im Rahmen dieser Erfindung eine Anordnung des Katalysators in einem Abstand vom Abgasauslass der Zylinder des Motors von weniger als 70 cm, bevorzugt weniger als 50 cm und ganz besonders bevorzugt weniger als 30 cm bezeichnet. Bevorzugt ist der motornahe Katalysator direkt nach der Zusammenführung der Abgaskrümmer in die Abgasleitung angeordnet. Alternativ kann der motornahe Katalysator in mehrere kleine Katalysatoren aufgeteilt sein, die in jedem einzelnen Abgaskrümmer angeordnet sind. Die weiteren folgenden Katalysatoren befinden sich damit in entsprechendem Abstand stromab des ersten motornahen Katalysators im Abgasstrang.

**[0056]** Erklärung der Figuren:

**[0057]** Fig. 1 Eine mögliche erfindungsgemäße Anordnung der motornahen Stickoxid-Speicherkatalysatoren (**1** und **1'**) sowie der im Unterboden angeordnete Stickoxid-Speicherkatalysatoren (**2**) im Abgasstrang.

**[0058]** Fig. 2 Eine mögliche erfindungsgemäße Anordnung der motornahen Stickoxid-Speicherkatalysatoren (**1** und **1'**) sowie der im Unterboden angeordneten Stickoxid-Speicherkatalysatoren (**2** und **2'**) im Abgasstrang.

**[0059]** Fig. 3 Eine mögliche erfindungsgemäße Anordnung der motornahen Stickoxid-Speicherkatalysatoren (**1** und **1'**) sowie der im Unterboden angeordneten Stickoxid-Speicherkatalysatoren (**2** und **2'**) und der zwischen dem motornahen und Unterboden-Stickoxid-Speicherkatalysatoren befindliche SCR Katalysatoren (**3** und **3'**) im Abgasstrang.

**[0060]** Fig. 4 Eine mögliche erfindungsgemäße Anordnung der motornahen Stickoxid-Speicherkatalysatoren (**1** und **1'**) sowie der im Unterboden angeordneten Stickoxid-Speicherkatalysatoren (**2**) und der zwischen dem motornahen und Unterboden-Stickoxid-Speicherkatalysatoren befindlichen SCR Katalysatoren (**3**) im Abgasstrang.

**[0061]** Fig. 5 Eine mögliche erfindungsgemäße Anordnung der motornahen Stickoxid-Speicherkatalysatoren (**1** und **1'**) sowie des im Unterboden angeordneten Stickoxid-Speicherkatalysators (**2**) mit nachgeschaltetem SCR Katalysator (**3**) und einem weiteren Stickoxid-Speicherkatalysator (**4**) im Abgasstrang.

**[0062]** Fig. 6 Auflistung des NOx-Umsatzes gegen die Temperatur im motornahen Stickoxid-Speicherkatalysator bei Regeneration nur über dem motornahen Stickoxid-Speicherkatalysator (mn-NSK) und Regeneration über dem Unterboden-Stickoxid-Speicherkatalysator (ub-NSK).

**[0063]** Fig. 7 Auflistung des Kohlenwasserstoff-(HC)-Umsatzes gegen die Temperatur im motornahen Stickoxid-Speicherkatalysator bei Regeneration nur über dem motornahen Stickoxid-Speicherkatalysator (nm-NSK) und Regeneration über dem Unterboden-Stickoxid-Speicherkatalysator (ub-NSK).

**[0064]** Fig. 8 Modellgasergebnisse des Stickoxid-(NOx)Umsatzes gegen die Eintrittstemperatur eines Stickoxid-Speicherkatalysators im frischen Zustand und nach 25 h Alterung bei 800, 900 und 1000°C in hydrothermaler Atmosphäre (10% Sauerstoff, 10% Wasserdampf, 80% Stickstoff).

**[0065]** Fig. 9 Eine mögliche erfindungsgemäße Regelung eines Katalysatorsystems zur Reinigung des Abgases eines Magermotors (**1**), bestehend aus den Stickoxid-Speicherkatalysatoren (**3**, **5** und **7**), mit ihren jeweils führenden Temperatursensoren (**9**, **10** und **11**) und folgenden Gassensor (**4**, **6** und **8**), wobei die Sensoren ihre Signale an die Motorsteuerung (**2**) übertragen, die ihrerseits den Betrieb des Magermotors (**1**) steuert. In der Motorsteuerung (**2**) ist die Regelstrategie hinterlegt:

I) Während des Betriebzustandes des Magerbetriebs (OP-lean) wird jeder Stickoxid-Speicherkatalysatoren (**3**, **5** und **7**) überwacht, erstens ob er unter den aktuellen Bedingungen ausreichend Stickoxid-Speicheraktivität aufweist und zweitens ob ein Stickoxid-Schwellenwert erreicht wird.

IIa) Sind beide Bedingungen für den Stickoxid-Speicherkatalysator (**3**) erfüllt, so erfolgt der Wechsel (RGN Start1) der Motorsteuerung (**2**) und folglich auch des Magermotors (**1**) in den Betriebszustand (OP-RGN1), zur Regeneration des Stickoxid-Speicherkatalysators (**3**). Während dieses Betriebszustandes (OP-RGN1) wird vom Motor (**2**) fettes Abgas emittiert und mittels des Gassensors (**4**) überwacht, ob das Kriterium für den Regenerationsabbruch erfüllt wird. Ist die Bedingung erfüllt, so erfolgt der Wechsel (RGN Stop1) zurück in den Betriebszustand (OP-lean).

IIb) Sind beide Bedingungen für den Stickoxid-Speicherkatalysator (**5**) erfüllt, so erfolgt der Wechsel (RGN Start2) der Motorsteuerung (**2**) und folglich auch des Magermotor (**1**) in den Betriebszustand (OP-RGN2), zur Regeneration der Stickoxid-Speicherkatalysatoren (**3** und **5**). Während dieses Betriebszustandes (OP-RGN2) wird vom Motor (**2**) fettes Abgas emittiert und mittels

des Gassensors (**6**) überwacht, ob das Kriterium für den Regenerationsabbruch erfüllt wird. Ist die Bedingung erfüllt, so erfolgt der Wechsel (RGN Stop2) zurück in den Betriebszustand (OP-lean).
IIc) Sind beide Bedingungen für den Stickoxid-Speicherkatalysator (**7**) erfüllt, so erfolgt der Wechsel (RGN-Start3) der Motorsteuerung (**2**) und folglich auch des Magermotor (**1**) in den Betriebszustand (OP-RGN3), zur Regeneration der Stickoxid-Speicherkatalysatoren (**3**, **5** und **7**). Während dieses Betriebszustandes (OP-RGN3) wird vom Motor (**2**) fettes Abgas emittiert und mittels des Gassensors (**8**) überwacht, ob das Kriterium für den Regenerationsabbruch erfüllt wird. Ist die Bedingung erfüllt, so erfolgt der Wechsel (RGN Stop3) zurück in den Betriebszustand (OP-lean).

Beispiele:

**[0066]** In einem Test wurden zwei verschiedene Regenerationsstrategien für ein System bestehend aus einem motornahen Stickoxid-Speicherkatalysator und einem Unterboden-Stickoxid-Speicherkatalysator angewendet. Bei dem ersten Versuch wurde die Regeneration der Katalysatoren eingeleitet, wenn eine Konzentration von 100 ppm Stickoxide nach dem Unterboden-Stickoxid-Speicherkatalysator mittels Stickoxidsensor detektiert wurde (Abbruch nach Unterboden-Stickoxid-Speicherkatalysator). Beim zweiten Versuch wurde die Regeneration eingeleitet, wenn 200 ppm Stickoxide nach dem motornahen Stickoxid-Speicherkatalysator gemessen wurde (Abbruch über dem motornahen Stickoxid-Speicherkatalysator). **Abb. 6** und **Abb. 7** zeigen die entsprechenden Stickoxid und Kohlenwasserstoff-Konvertierungen in Abhängigkeit von den mittleren Abgastemperaturen im motornahen Stickoxid-Speicherkatalysator in den entsprechenden stationären Betriebspunkten des Motors. Es ist deutlich zu sehen, dass vor allem bei niedrigen Temperaturen eine erheblich bessere Stickoxid- und Kohlenwasserstoff-Reduktion zu beobachten ist, wenn das System nur über dem motornahen Stickoxid-Speicherkatalysator regeneriert wird. Ferner unterbleibt beim Abbruch der Magerphase über dem motornahen Stickoxid-Speicherkatalysator die Emission von Ammoniak, welcher zwar bei der Regeneration über dem motornahen Stickoxid-Speicherkatalysator gebildet wird, aber im Unterbaden-Stickoxid-Speicherkatalysator wieder aufoxidiert und eingespeichert wird.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Behandlung von Abgasen eines überwiegend mager betriebenen Verbrennungsmotors mit einer Abgasreinigungsvorrichtung aufweisend einen vorzugsweise motornahen ersten Stickoxid-Speicherkatalysator und abströmseitig dazu im gleichen Abgasstrang einen oder mehrere weitere Stickoxid-Speicherkatalysatoren, welche jeweils räumlich getrennt zueinander angeordnet sind, und die Initiierung der Fettphase zur Regeneration der Stickoxid-Speicherkatalysatoren durch Erreichen von vorgegebenen Stickoxid-Schwellenwerten hinter den einzelnen Katalysatoren erfolgt,
**dadurch gekennzeichnet**, dass
a) der Abbruch der Fettphase zur Regeneration der Stickoxid-Speicherkatalysatoren dann eingeleitet wird, wenn hinter dem Katalysator, hinter dem der vorgegebene Stickoxid-Schwellenwerten als erstes überschritten wurde, ein bestimmter Lambda-Wert unterschritten wird, wobei
b) die jeweiligen vorgegebenen Stickoxid-Schwellenwerte in Strömungsrichtung immer niedriger gewählt werden, und wobei
c) ein Stickoxid-Speicherkatalysator der eine vorgegebene Stickoxidspeicheraktivität nach der Regeneration nicht erreicht an der Regelung dann nicht mehr teilnimmt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Stickoxid-Speicheraktivität in Folge eines Effektes ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus zu hoher Temperatur, durch thermische Alterung und durch Vergiftung oder Kombinationen davon herabgesetzt ist.

3. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die jeweiligen Stickoxid-Schwellenwerte so angesetzt werden, dass der Stickoxid-Schwellenwert hinter dem letzten Katalysator in der Mehrheit der Betriebszustände des Motors unterhalb der relevanten gesetzlichen Vorgabe liegt.

4. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Anzahl der Stickoxid-Speicherkatalysatoren so bemessen wird, dass der Stickoxid-Schwellenwert hinter dem letzten Katalysator in der Mehrheit der Betriebszustände des Motors unterhalb der relevanten gesetzlichen Vorgabe liegt.

5. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass sich nach einem oder mehreren Stickoxid-Speicherkatalysatoren ein SCR-Katalysator befinden kann.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Abbruch der Fettphase zur Regeneration der Stickoxid-Speicherkatalysatoren erst dann eingeleitet wird, wenn hinter dem jeweiligen SCR-Katalysator, ein bestimmter Lambda-Wert unterschritten wird.

7. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass eine Entschwefelung eingeleitet werden kann, wenn die Temperatur des motornahen Stickoxid-Speicherkatalysators > 600°C beträgt.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass das entstehende schwefelhaltige Abgas an einem oder mehreren folgenden Stickoxid-Speicherkatalysator(en) mittels Bypassleitung vorbeigeführt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass eine Entschwefelung der weiteren Katalysatoren eingeleitet wird, wenn deren Temperatur > 550°C beträgt.

Es folgen 5 Blatt Zeichnungen

**Anhängende Zeichnungen**

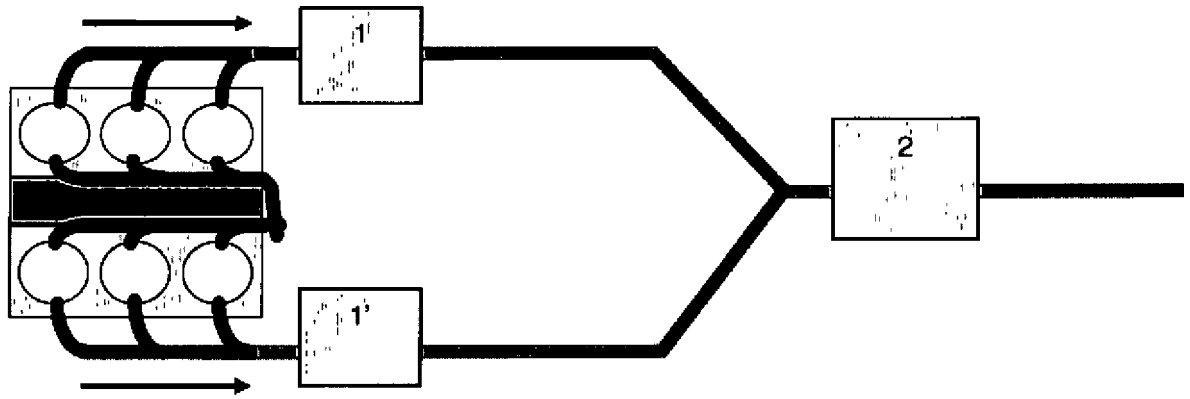



**Fig. 1**

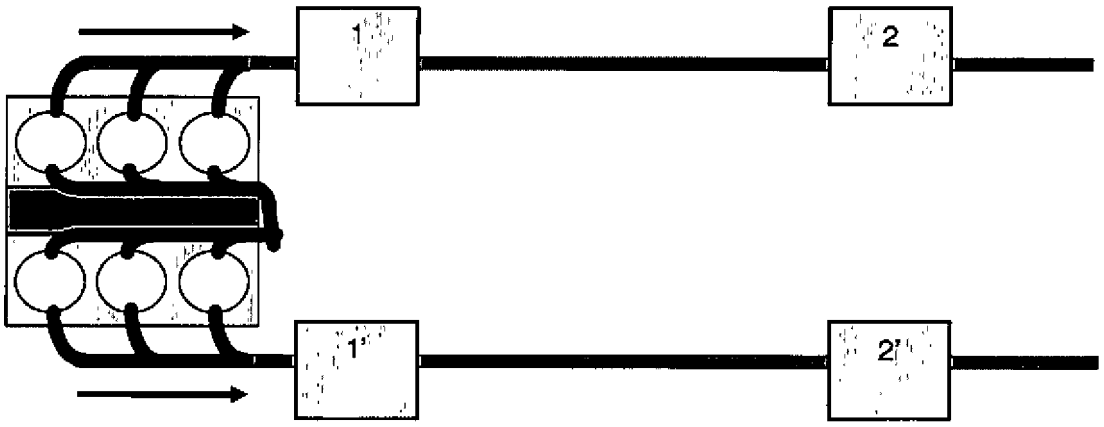



**Fig. 2**

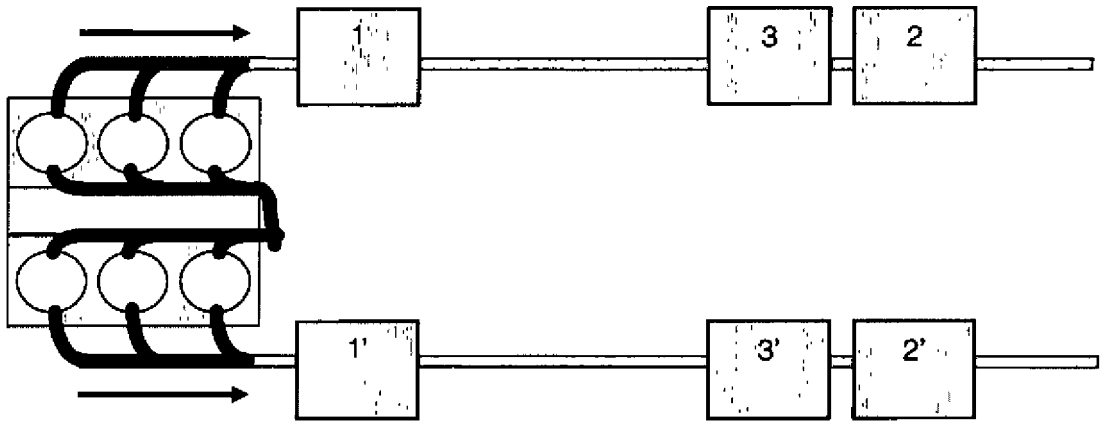



**Fig. 3**

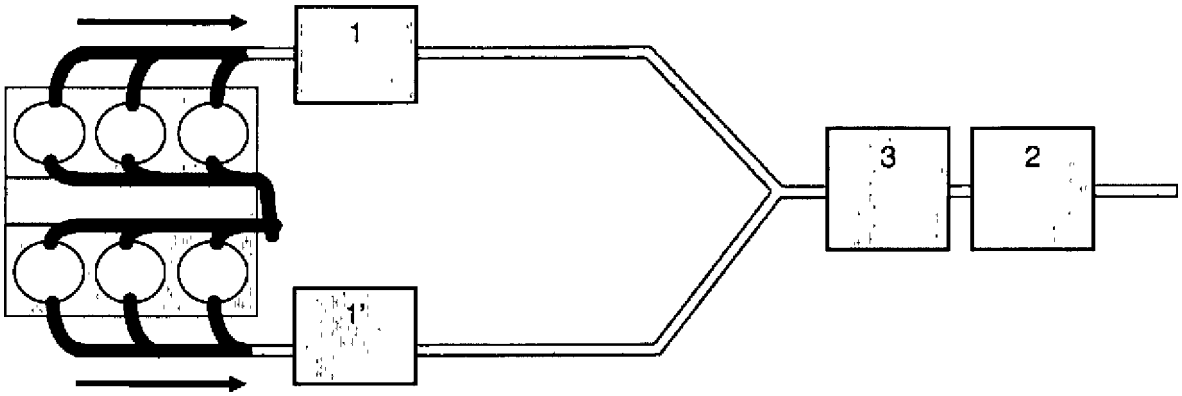



**Fig. 4**

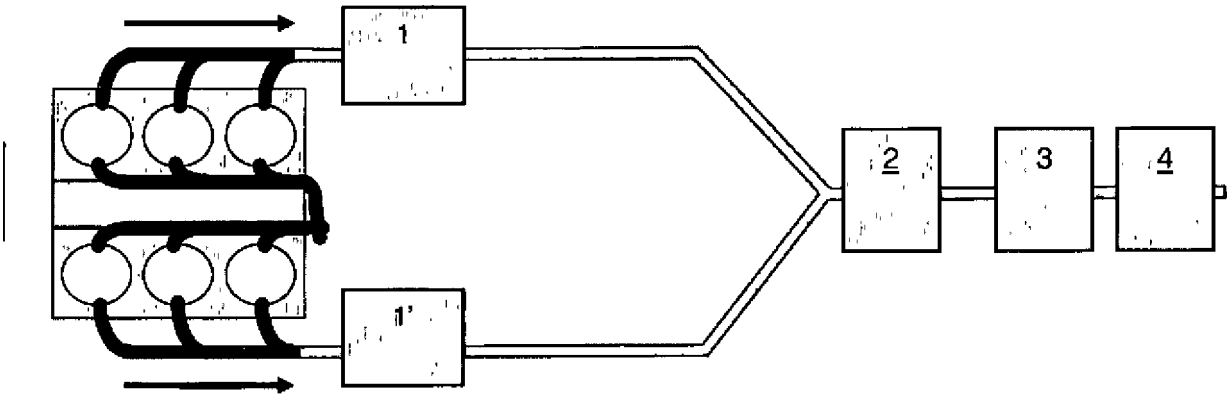

1
1'
2
3
4

Fig. 5

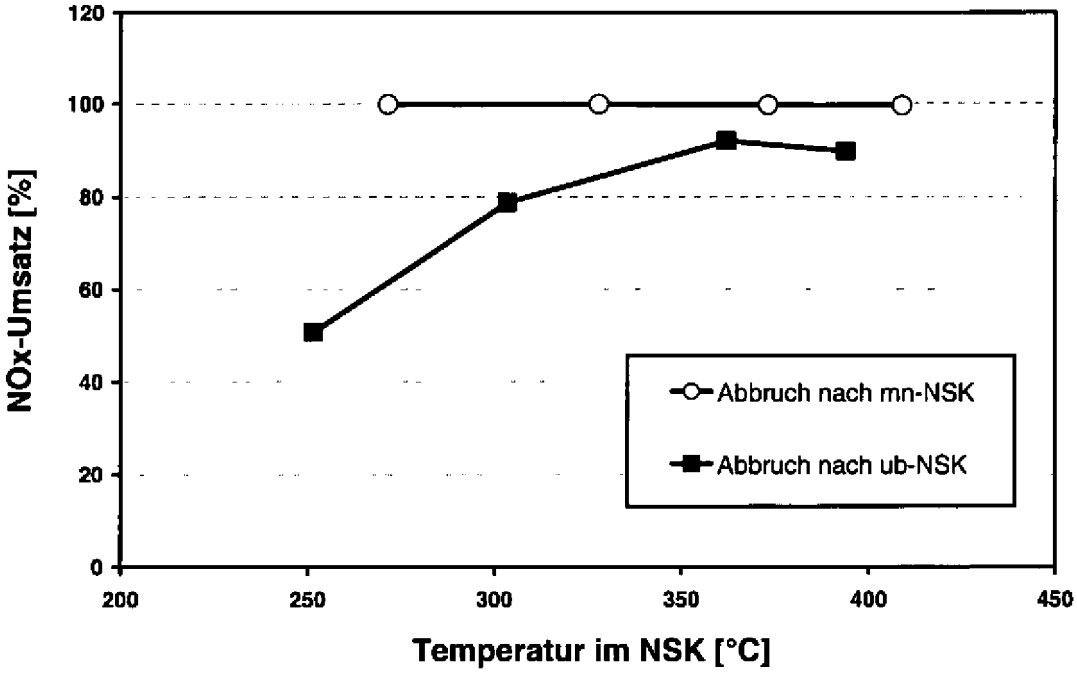

120
100
80
60
40
20
0
NOx-Umsatz [%]
200
250
300
350
400
450
Temperatur im NSK [°C]
Abbruch nach mn-NSK
Abbruch nach ub-NSK

Fig. 6

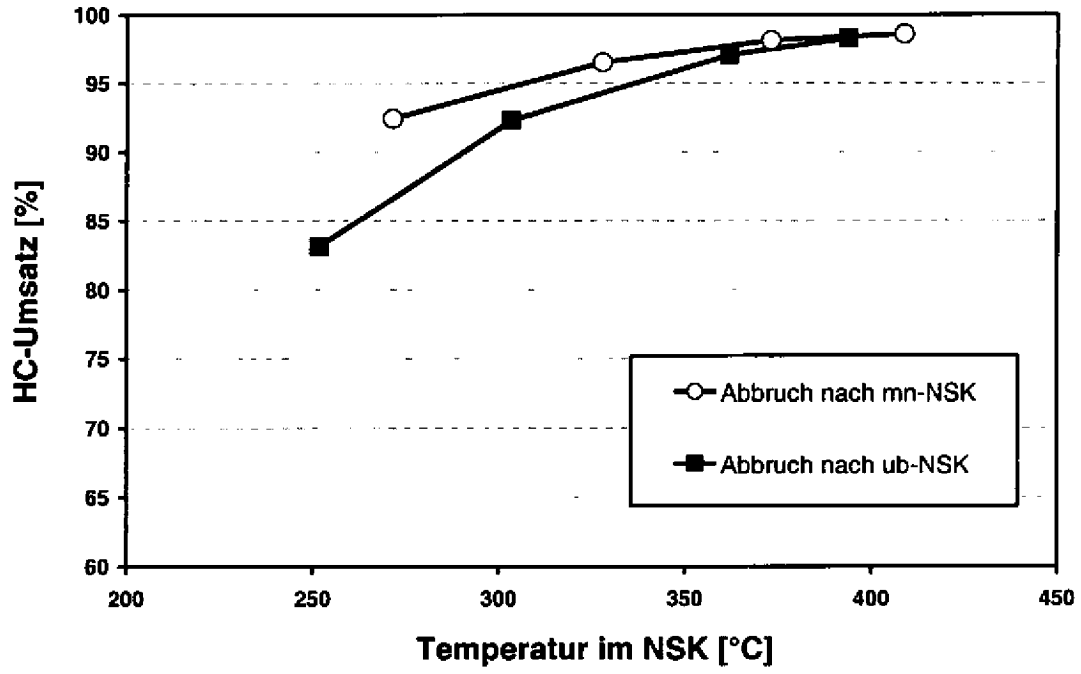

HC-Umsatz [%]
100
95
90
85
80
75
70
65
60
200
250
300
350
400
450
Temperatur im NSK [°C]
Abbruch nach mn-NSK
Abbruch nach ub-NSK

Fig. 7

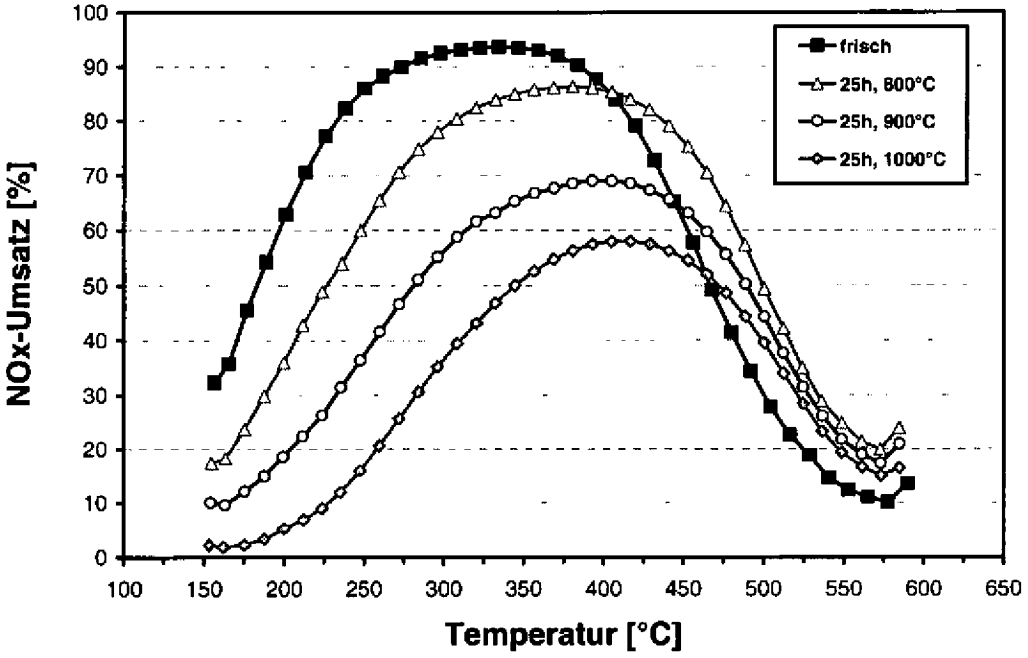

NOx-Umsatz [%]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
650
Temperatur [°C]
frisch
25h, 800°C
25h, 900°C
25h, 1000°C

Fig. 8

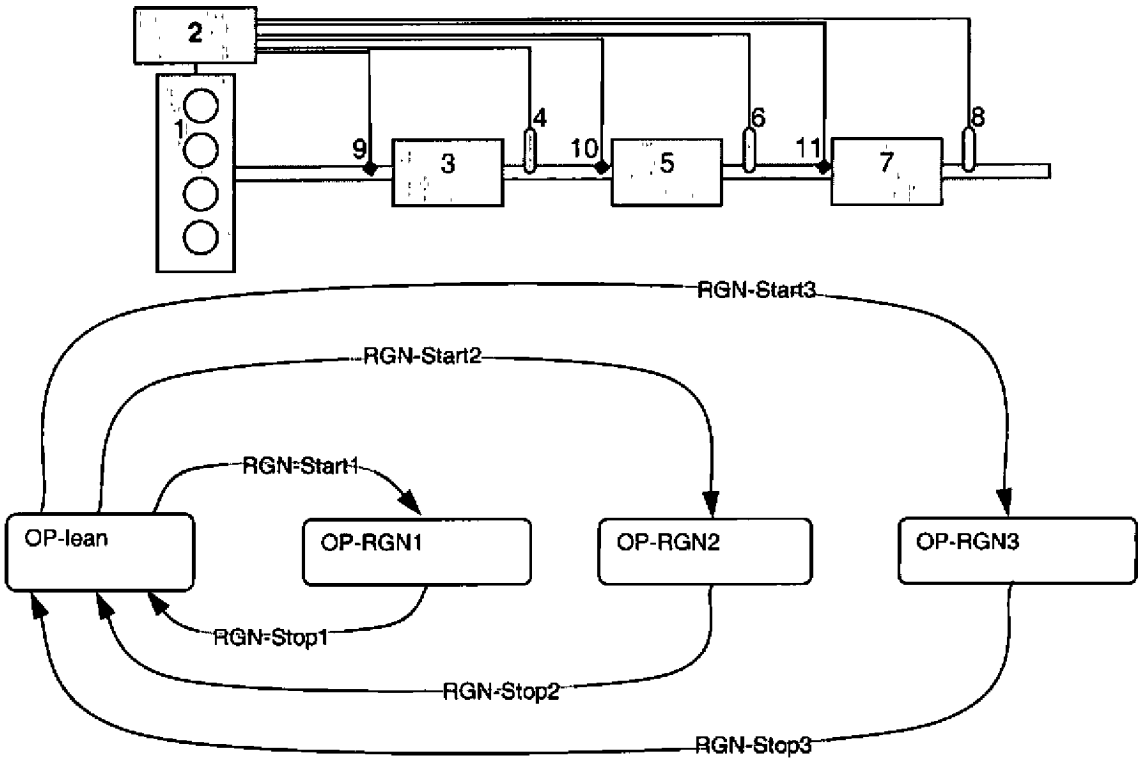

2
1
9
3
4
10
5
6
11
7
8
RGN-Start3
RGN-Start2
RGN-Start1
OP-lean
OP-RGN1
OP-RGN2
OP-RGN3
RGN-Stop1
RGN-Stop2
RGN-Stop3

Fig. 9