

Le traitement des NO_x sur les moteurs Diesel

La dépollution des gaz d'échappement des moteurs Diesel est venue ces dernières années de plus en plus complexe. En effet, la réduction de la consommation de carburant, l'augmentation constant des rendements moteurs ainsi que des normes de dépollution de plus en plus sévères ont obligé les motoristes à développer de nouvelles technologies afin de traiter les polluants émis.

Une combustion parfaite ne produirait que de l'H₂O et du CO₂ mais malheureusement, nos moteurs consomment de l'air contenant entre autre de l'azote et la combustion ne se déroule pas toujours dans des conditions idéales, ce qui a pour conséquence de produire des gaz polluants. A l'heure actuelle, un moteur Diesel produit différents gaz dont seule une infime partie est polluante. En effet, seul environ 0,1% du volume est composé de gaz polluants (HC/CO/NO_x/SO₂/PM). Le reste est seulement composé de dioxyde de carbone, d'azote, d'oxygène et de vapeur d'eau.

▪ Les NO_x et leur traitement

Les oxydes d'azotes sont des molécules d'azotes qui, sous l'action d'une forte pression et d'une forte température (plus de 1900°C), se lient à une ou plusieurs molécules d'oxygène. Ils se présentent sous deux principales formes dans les gaz d'échappement; le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂) à des proportions bien différentes soit environ 90% de NO et seulement 10% de NO₂.

EGR

La recirculation des gaz d'échappement peut avoir lieu de manière interne (chevauchement des soupapes) ou externe (vanne EGR). La deuxième méthode permet un recyclage plus important des gaz d'échappement et donc une meilleure efficacité. Le taux est modulé par la gestion moteur selon des cartographies préenregistrées. Le principe de fonctionnement de l'EGR des moteurs diesel est de reprendre une partie des gaz d'échappement et les amener à nouveau dans la chambre de combustion (jusqu'à 50% du volume aspiré). Ceci permet:

- Une réduction de l'azote et de l'oxygène à disposition dans la chambre de combustion

- Un front de flamme moins rapide ce qui entraîne une diminution des pointes de températures
- L'apport de CO₂ et d'H₂O dans la chambre de combustion afin d'abaisser la température de la chambre de combustion
- Une réduction de la masse de gaz sortant à l'échappement et donc de la masse des NO_x (les normes mesurent des g/kWh).

L'EGR peut également être utilisé à froid chez certains constructeurs afin de favoriser la montée en température de la chambre de combustion à la fin du temps de compression. Ceci permet également de favoriser de faibles émissions de polluants lors des phases de réchauffage. L'EGR peut également être commandée afin d'obtenir une température de gaz d'échappement plus élevée ce qui favorise la régénération du filtre à particules.

EGR haute pression

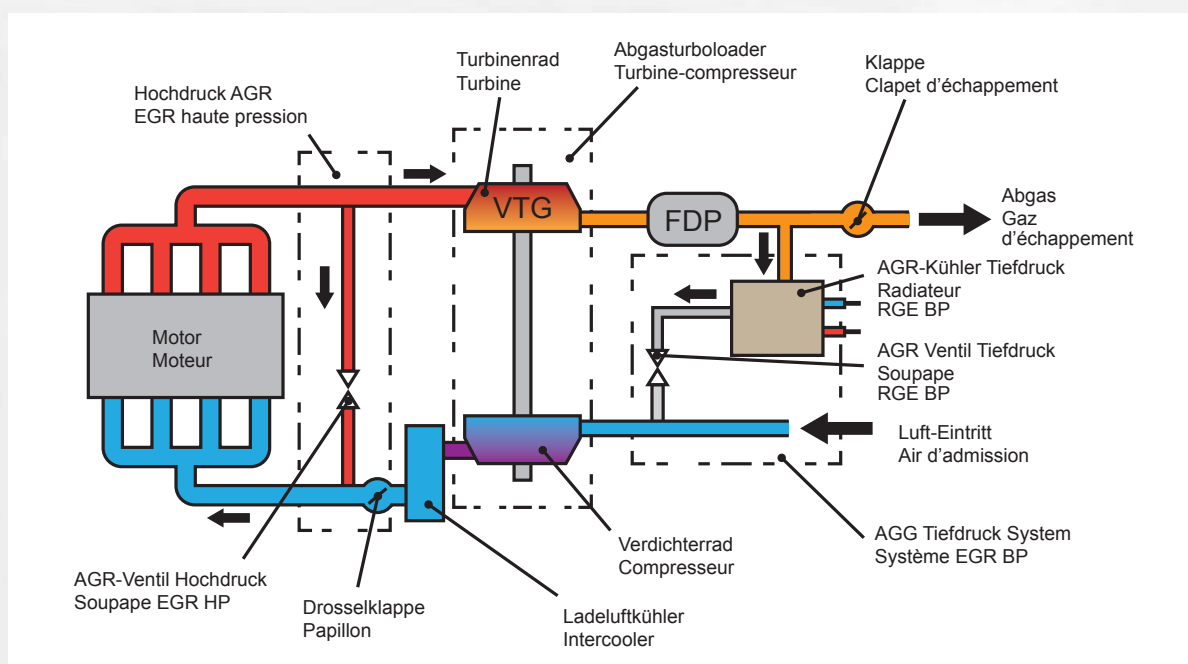
Dans le cas de l'EGR haute pression, les gaz sont prélevés avant le turbocompresseur ce qui permet de les avoir encore sous pression. Ceci a l'avantage de faciliter l'admission de ces gaz dans la tubulure d'admission après le turbocompresseur et peut éviter chez certains constructeurs la nécessité d'un papillon dans la tubulure d'admission. Les gaz, contenant cependant des particules (PM), ont tendance à encrasser les vannes EGR ainsi que les refroidisseurs et les soupapes. Cette méthode est privilégiée à froid ou lors de faible charge.

EGR basse pression

Dans ce cas, les gaz sont récupérés après le filtre à particules afin de ne pas encrasser le turbocompresseur, ils n'ont donc qu'une faible pression et sont admis à l'entrée du turbocompresseur afin d'être aspirés. Certains constructeurs montent également un

NO_x-Behandlung bei Dieselmotoren

Die Abgasreinigung bei Dieselmotoren ist in den letzten Jahren immer komplexer geworden. Der verringerte Kraftstoffverbrauch, die ständig steigende Motorleistung und die immer strengeren Abgasnormen zwingen die Motorhersteller, neue Technologien zur Bekämpfung der Schadstoffemissionen zu entwickeln.



Eine vollständige Verbrennung würde nur H₂O und CO₂ erzeugen, aber leider verbrauchen unsere Motoren Luft, die unter anderem Stickstoff enthält. Auch verläuft die Verbrennung nicht immer unter idealen Bedingungen, was zur Entstehung von Schadgasen führt. Ein Dieselmotor produziert heutzutage verschiedene Gase, von denen nur ein kleiner Teil umweltschädlich ist. Effektiv besteht nur etwa 0,1 % des Volumens aus Schadgasen (HC/CO/NO_x/SO₂/PM). Der Rest besteht nur aus Kohlendioxid, Stickstoff, Sauerstoff und Wasserdampf.

• Stickoxide (NO_x) und ihre Behandlung

Stickoxide sind Stickstoffmoleküle, die sich unter hohem Druck und hoher Temperatur (über 1900 °C) an ein oder mehrere Sauerstoffmolekü-

le binden. Sie treten in den Abgasen in zwei Hauptformen auf: Stickstoffmonoxid (NO) mit einem Anteil von etwa 90 % und Stickstoffdioxid (NO₂) mit nur etwa 10 % Anteil.

Abgasrückführung (AGR)

Die Abgasrückführung kann intern (überlappende Ventile) oder extern (AGR-Ventil) erfolgen. Die zweite Methode ermöglicht eine stärkere Rückführung der Abgase und damit eine höhere Effizienz. Deren Menge reguliert der Motor entsprechend den hinterlegten Mappings. Die AGR von Dieselmotoren bezweckt, einen Teil der Abgase wieder in den Brennraum zu bringen (bis zu 50 % des Ansaugvolumens), was Folgendes ermöglicht:

- Reduzieren der Stickstoff- und Sauerstoffverfügbarkeit in der Brennkammer

papillon juste avant le point de liaison afin de faciliter le recyclage à forte charge et faible régime.

Refroidisseur EGR

Dans certains cas, un échangeur thermique peut être monté en série sur l'EGR. Ceci permet d'abaisser la température des gaz admis et donc d'améliorer encore l'efficacité de l'EGR. C'est en règle générale un échangeur gaz/liquide de refroidissement qui est régulièrement doté de bypass permettant de le contourner lors de certaines phases de fonctionnement comme par exemple le réchauffage moteur.

A l'heure actuelle, la plupart des motoristes utilisent une combinaison des systèmes EGR haute et basse pression ainsi qu'un refroidisseur afin de pouvoir réduire les NO_x de manière la plus efficace possible dans toutes les conditions de fonctionnement.

SCR

Le système de réduction sélective par catalyse (Selectiv Catalytic Reduction) permet comme son nom l'indique de réduire seulement un polluant sélectionné, dans notre cas, les oxydes d'azote. Ce système se compose d'un réservoir chauffé (l'AdBlue gèle à -11 °C) avec une jauge de niveau, d'une unité de pompage et dosage, d'un injecteur ainsi qu'un catalyseur avec déflecteur

et différents capteurs (température, NO_x, ammoniac). En fonction de la quantité de NO_x mesurée à la sortie du SCR, le boîtier commandera l'injection d'AdBlue nécessaire aux réactions chimiques permettant de les réduire. L'injection doit être précise car si l'AdBlue est injecté en trop grande quantité, de l'ammoniac sortira de l'échappement. Certains constructeurs utilisent un catalyseur à ammoniac en sortie de ligne afin de traiter les excédents et/ou contrôlent la quantité d'ammoniac émise grâce à une sonde.

Fonctionnement

Tout d'abord, les gaz traversent un catalyseur à oxydation ce qui permet d'oxyder le CO, les HC et les NO qui sont majoritairement présent dans la famille des NO_x. En effet, le NO₂ réagit mieux avec le système SCR. Les gaz poursuivent ensuite leur chemin en direction du SCR.

L'AdBlue est une solution d'urée (32,5%) mélangée à de l'eau distillée. Sa formule chimique est (NH₂)₂CO+H₂O. Lorsqu'il est injecté dans le système d'échappement, celui-ci se mélange aux gaz grâce à un déflecteur qui crée des turbulences. La distance entre l'injecteur et l'entrée du SCR est importante car elle permet la vaporisation de l'AdBlue. Grâce à la haute température, il se produit une hydrolyse et la molé-

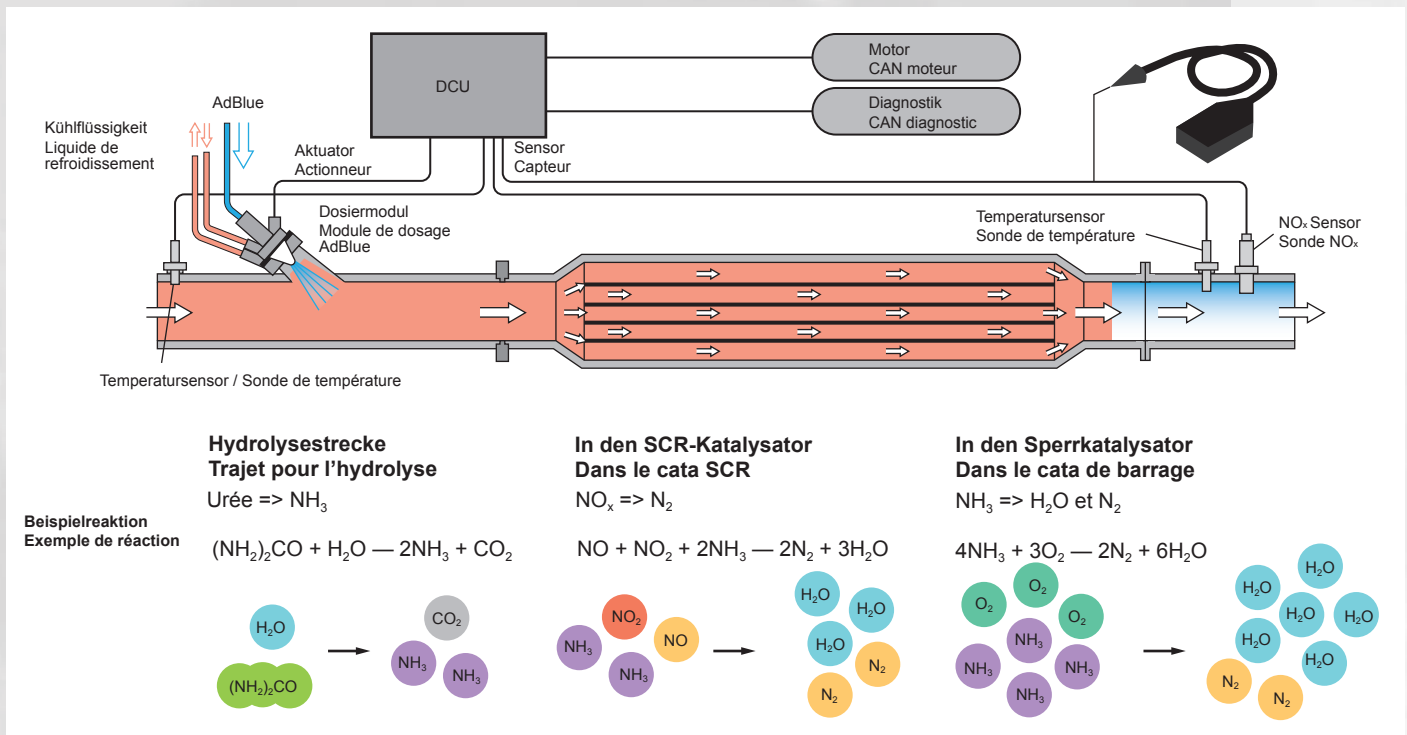
cule se sépare en NH₃ et CO₂. A partir de cette étape, de l'ammoniac (NH₃) est disponible pour effectuer la réduction catalytique. L'ammoniac réagit avec le NO₂ grâce à la matière active du SCR et se transforme en N₂ et H₂O. A la sortie du SCR, si tout l'ammoniac a été utilisé, il ne ressort donc plus que du CO₂, de l'H₂O et de l'N₂. Le gaz polluant a donc été réduit avec un taux d'efficacité de plus de 95%.

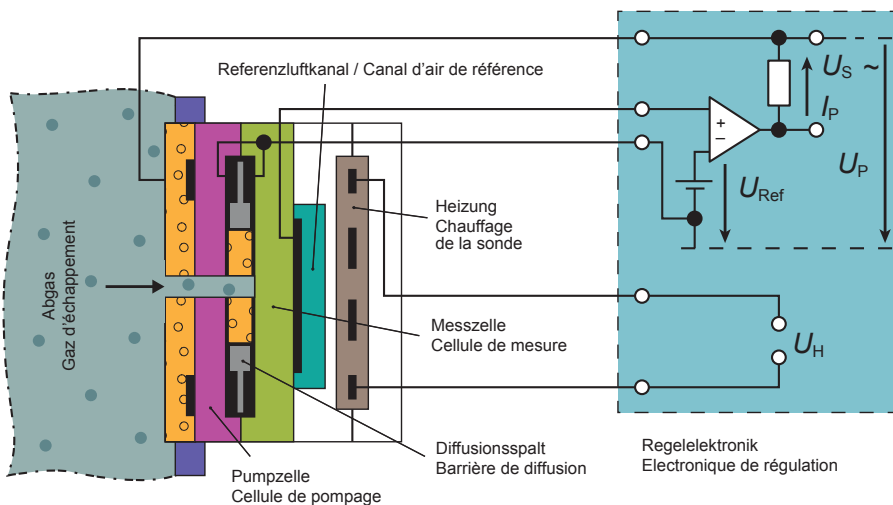
Attention, l'AdBlue gèle dès -11 °C et se dégrade dès 25 °C. Lorsqu'il est chauffé à plus de 50 °C, l'AdBlue commence à dégager des vapeurs toxiques d'ammoniac. L'AdBlue est également une substance irritante et le port de lunettes et gants est recommandé lors de sa manipulation. Il est également oxydant pour l'aluminium, l'acier et le cuivre. La meilleure façon de rincer l'AdBlue qui aurait chrystallisé est de le rincer abondamment avec de l'eau chaude.

La sonde à oxygène à large bande

La sonde large bande est composée de deux cellules de Nerst. Comme la majeure partie des composants électriques, le phénomène est réversible. C'est-à-dire que lorsque l'on a une quantité d'oxygène différentes entre les deux électrodes, des ions d'O₂ passent à travers la céramique poreuse et les électrons circulent dans le câblage créant ainsi une tension. Lorsque l'on

System SCR
Système SCR





Breitband-Sauerstoffsonde
La sonde à oxygène à large-bande

- Weniger schnelle Flammenfront, was zu niedrigeren Temperaturspitzen führt
- Einbringen von CO₂ und H₂O in die Brennkammer, um die Verbrennungstemperatur abzusenken
- Verringern der Abgasmasse und damit der NO_x-Masse (die Normen sind in g/kWh bemessen)

Die AGR kann bei einigen Herstellern auch im Kaltbetrieb eingesetzt werden, um den Temperaturanstieg in der Brennkammer am Ende der Verdichtungszeit und somit auch geringe Schadstoffemissionen während der Erwärmungsphasen zu begünstigen. Eine entsprechend eingestellte AGR kann auch zu einer höheren Abgastemperatur führen und damit die Regeneration des Partikelfilters begünstigen.

Hochdruck-AGR

Bei der Hochdruck-AGR werden die Gase vor dem Turbolader abgeleitet, sodass sie noch unter Druck stehen. Dies hat den Vorteil, dass diese Gase nach dem Turbolader in die Ansaugleitung geleitet werden können und dass bei einigen Herstellern dadurch dort keine Drosselklappe benötigt wird. Partikelhaltige (PM-)Gase neigen jedoch dazu, AGR-Ventile sowie Kühler und Ventile zu verschmutzen. Dieses Verfahren kommt bei kalten Temperaturen oder geringen Belastungen bevorzugt zur Anwendung.

Niederdruck-AGR

Bei diesem System werden die Abgase nach dem Partikelfilter entnommen. Dies hat den Vorteil, dass die reduzierte Russmenge die relevanten Bauteile wie AGR-Ventil und Kühler weniger verschmutzt werden. Zudem sind die rückgeführten Abgase kühler und verbessern so den Wirkungsgrad.

Da der Abgasdruck nach dem DPF geringer ist als der Druck im Ansaugkollektor werden oftmals Drosselklappen montiert, um die rückgeführten Abgase besser dosieren zu können.

AGR-Kühler

AGR-Kühler senken die Temperatur der rückgeführten Abgase, dadurch erhöht sich die Abgasdichte und somit auch die mögliche Rückführrate. Je nach System werden die Kühler im Kühlwasserkreislauf des Motors integriert oder werden über den Fahrtwind gekühlt. Wegen der Entstehung von Schwefel und Schwefelsäure in den Ablagerungen müssen die Kühler aus Chromstahl gefertigt sein.

Derzeit verwenden die meisten Motorhersteller eine Kombination aus Hoch- und Niederdruck-AGR-Systemen sowie einem Kühler, um die NO_x-Emissionen unter allen Betriebsbedingungen so effizient wie möglich zu senken.

▪ **Selektive katalytische Reduktion (SCR)**

Das Verfahren der selektiven katalytischen Reduktion ermöglicht es, wie der Name schon sagt, nur den Gehalt eines ausgewählten Schadstoffs zu reduzieren, in unserem Fall die Stickoxide. Das System verfügt über einen beheizten Behälter (Gefrierpunkt bei -11 °C) mit Füllstandsanzeiger, einer Pump- und Dosiereinheit, einen Injektor, ein Mischrohr für die bessere Verteilung, ein SCR-Kat mit angebautes Ammoniak Sperrkatalysator (Slip-Kat) und verschiedenen Sensoren (Temperatur, NO_x, Ammoniak). Abhängig von der gemessenen NO_x-Menge am Ausgang der SCR-Einheit reguliert die Steuereinheit die AdBlue-Injektion, die für die chemischen Reaktionen zur NO_x-Reduktion erforderlich ist. Die Injektion muss präzise erfolgen, da aus dem Auspuff Ammoniak austritt, falls zu viel AdBlue vorhanden ist. Einige Hersteller verwenden einen Ammoniakkatalysator am Leitungsausgang, um Überschüsse zu verarbeiten und/oder überwachen die Ammoniakmenge mit Hilfe einer Sonde.

Funktionsweise

Zunächst passieren die Gase einen Oxidationskatalysator, wodurch CO, HC und NO oxidiert werden, die hauptsächlich in der NO_x-Gruppe vorkommen. Dies liegt daran, dass NO₂ besser mit dem SCR-System reagiert. Die Gase strömen dann weiter in Richtung SCR.

AdBlue ist eine mit destilliertem Wasser vermischte Harnstofflösung (32,5%). Seine chemische Formel lautet (NH₂)₂CO+H₂O. Es wird in das Auspuffsystem eingespritzt, vermischt sich durch einen Mischrohr (Hydrolysestrecke), der Turbulenzen erzeugt, mit den Abgasen. Der Abstand zwischen Injektor und SCR-Eingang ist wichtig, da er die Verdampfung von AdBlue ermöglicht. Die hohe Temperatur löst eine Hydrolyse aus und das Molekül zerfällt in NH₃ und CO₂. Ab diesem Schritt steht Ammoniak (NH₃) für die katalytische Reduktion zur Verfügung. Das Ammoniak reagiert dank des SCR-Wirkstoffs mit dem NO₂ und wandelt sich in N₂ und H₂O um. Wenn das gesamte

alimente une même cellule, le phénomène inverse se passe. Les électrons circulants obligent des ions d'O₂ à traverser la céramique poreuse d'une électrode à l'autre. Cela permet donc de « pomper » des ions d'oxygène.

Lors de la mesure avec une sonde large bande, une cellule Nerst mesure la quantité d'oxygène présent dans la chambre de mesure de la sonde. La tension émise arrive sur un amplificateur opérationnel qui est en équilibre si la tension est de 450 mV. Dès que cette valeur n'est pas atteinte, l'amplificateur opérationnel va émettre un courant sur sa sortie alimentant ainsi la cellule de pompage. Plus le courant est grand, plus le lambda est pauvre. Si le courant devenait négatif, la cellule de pompage fonctionnerait en inverse et permettrait d'amener des ions d'oxygène dans la chambre, signifiant que le mélange est cette fois-ci riche.

• La sonde NO_x

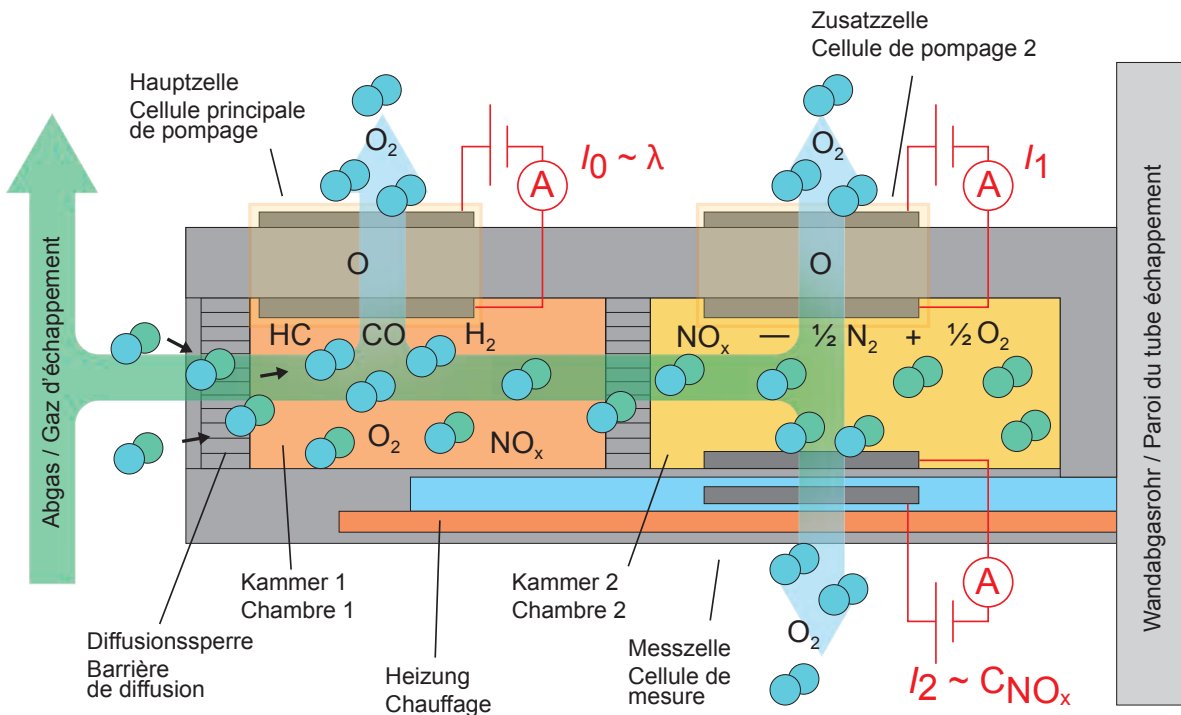
La sonde NO_x fonctionne selon le même principe qu'une sonde à oxygène à large bande. C'est-à-dire qu'elle contient également des cellules de mesures et des cellules de pompage.

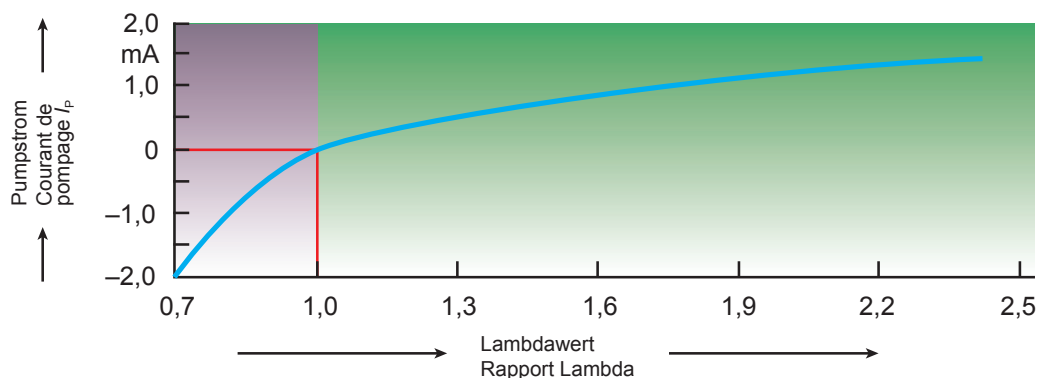
Les gaz rentrent dans la chambre 1 et la cellule de pompage est activée afin de retirer tous les oxygènes libres. Un

canal reliant la première chambre à la deuxième est munie d'un petit catalyseur à réduction. Celui-ci va donc réduire les NO_x et il y aura donc dans la chambre 2 un mélange d'N₂ et d'O₂. La cellule de mesure contrôle le taux d'oxygène présent dans la chambre et émet une tension au boîtier de la sonde. Le boîtier à une valeur cible de 450 mV. Celui-ci va activer la cellule de pompage 2 afin d'extraire les ions d'oxygène de la chambre 2 et maintenir la valeur de 450 mV sur la cellule de mesure. Le signal d'intensité nécessaire à la cellule de pompage pour retirer les ions d'oxygène est donc proportionnel aux oxydes d'azotes ayant été réduit dans la sonde. On peut donc se baser sur ce signal pour déduire la quantité réelle d'oxydes d'azotes présents dans les gaz d'échappement. ■

Damien Jaquet

NO_x Sensor
Sonde NO_x





Signal Breitband-Sauerstoffsonde
Signal sonde large bande

Ammoniak verbraucht wurde, werden am Ende des SCR nur noch CO_2 , H_2O und N_2 freigesetzt. Dies reduziert den Gehalt an Schadgas mit einer Effizienz von über 95%.

Hinweis: AdBlue gefriert bereits bei -11°C und zerfällt bei 25°C . Wird es auf über 50°C erhitzt, beginnt AdBlue giftige Ammoniakdämpfe freizusetzen. AdBlue ist ausserdem eine reizende Substanz und es empfiehlt sich, bei der Handhabung Brille und Handschuhe zu tragen. Es findet auch Verwendung als Oxidationsmittel für Aluminium, Stahl und Kupfer. Am besten kann kristallisiertes Ad-Blue mit warmen Wasser gereinigt werden.

• Die Breitband-Sauerstoffsonde

Die Breitbandsonde besteht aus zwei Nerst-Zellen. Wie bei den meisten elektrischen Komponenten ist der Vorgang umkehrbar. Das heisst, dass wenn die beiden Elektroden eine unterschiedlich grosse Sauerstoffmenge aufweisen, O_2 -Ionen durch die poröse Keramik strömen: Die Elektronen zirkulieren durch die Verdrahtung, was eine Spannung erzeugt. Wenn man die gleiche Zelle mit Strom versorgt, passiert das Gegenteil. Zirkulierende Elektronen bewirken, dass O_2 -Ionen die poröse Keramik von einer Elektrode zur anderen durchqueren. Dadurch können Sauerstoffionen «gepumpt» werden. Bei der Messung mit einer Breitband-Sonde misst eine Nerst-Zelle die Sauerstoffmenge in der Mess-

kammer der Sonde. Die ausgegebene Spannung trifft auf einen Operationsverstärker, der sich im Gleichgewicht befindet, wenn die Spannung 450mV beträgt. Sobald dieser Wert unterschritten wird, gibt der Operationsverstärker einen Strom an seinem Ausgang ab und versorgt so die Pumpzelle mit Energie. Je höher die Strömung, desto niedriger ist das Lambda. Wenn der Strom negativ wird, arbeitet die Pumpzelle in umgekehrter Richtung und bringt Sauerstoffionen in die Kammer. Dies bedeutet, dass die Mischung diesmal angereichert ist.

• Die NO_x -Sonde

Die NO_x -Sonde arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie eine Sauerstoff-Breitband-Sonde. Das bedeutet, dass sie auch Mess- und Pumpzellen enthält.

Das Gas tritt in die Kammer 1 ein und die Pumpzelle wird aktiviert, um allen freien Sauerstoff zu entziehen. Ein Kanal, der die erste mit der zweiten Kammer verbindet, ist mit einem kleinen Reduktionskatalysator ausgestattet. Dies verringert die NO_x -Emissionen, und in der Kammer 2 entsteht eine Mischung aus N_2 und O_2 . Die Messzelle überwacht den Sauerstoffgehalt in der Kammer und erzeugt eine Spannung an der Steuereinheit der Sonde. Die Steuereinheit hat einen Sollwert von 450mV . Dieser aktiviert die Pumpzelle 2, um die Sauerstoffionen aus der Kammer 2 zu extrahieren und den Wert von

450mV an der Messzelle aufrechtzuerhalten. Das Intensitätssignal, das die Pumpzelle zur Entnahme der Sauerstoffionen benötigt, ist daher proportional zu den in der Sonde reduzierten Stickoxiden. Aus diesem Signal kann die tatsächliche Menge an Stickoxiden in den Abgasen abgeleitet werden. ■

Damien Jaquet