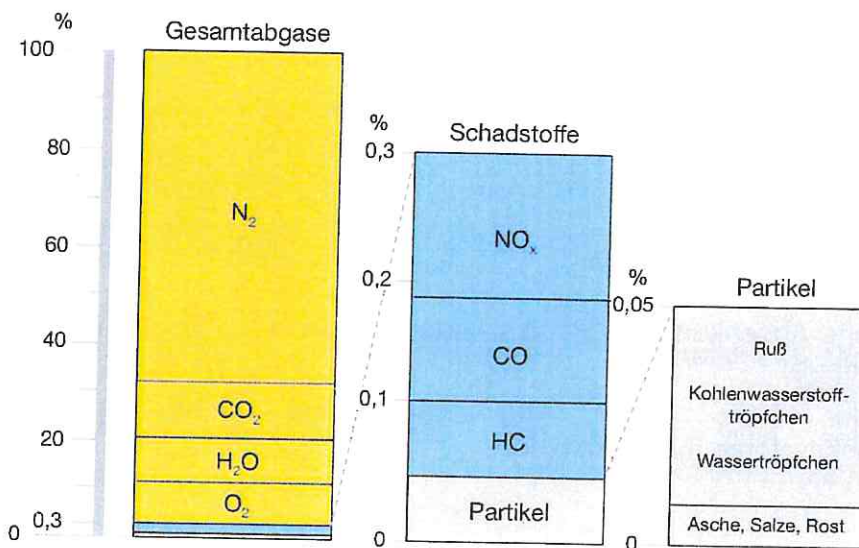


Abgasnachbehandlung bei Dieselmotoren



Bei Dieselmotoren zählen nur 0,3% der Rohemissionen zu den giftigen Abgasen.

- Für die Euro 3 Norm reichte bei PKW- Motoren:
 - Eine Hochdruckeinspritzung
 - Ein Oxidationskatalysator
 - Eine Abgasrückführung (AGR)
- Für die Euro 4 Norm wurde aus öffentlichem Druck, zusätzlich ein Vollstrom-Partikelfilter (DPF) eingebaut, der eine Verringerung des Partikelaustrittes von mehr als 90% ermöglicht.

Bei der Nachrüstung von Partikelfiltern kommen Teilstrom- Partikelfilter zum Einsatz, die ohne aufwändige Änderung des Gesamtkonzepts eingebaut werden können.
Achtung: Wenn Katalysator älter als 5 Jahre und/oder mehr als 80.000 km Laufleistung hat, muss dieser erneuert werden.

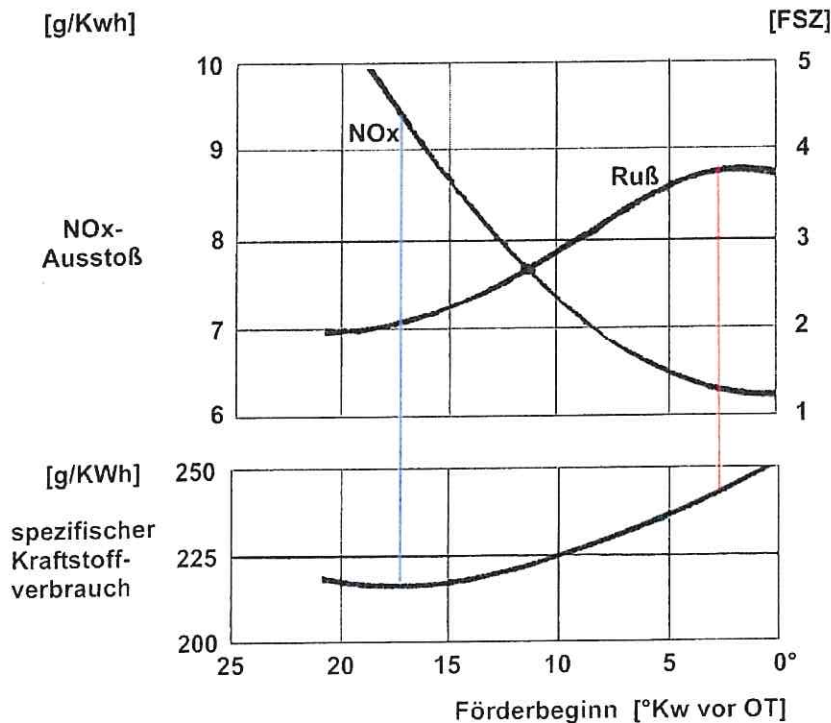
- Für die Euro 5 Norm wurde der DPF zur Notwendigkeit.
 - Bei schweren Fahrzeugen wurde hier ein NO_x Nachbehandlungssystem erforderlich.
- Für die Euro 6 Norm sind alle Systeme erforderlich:
 - AGR, DOC, DPF, NO_x - Speicherkat oder SCR- Katalysator

Diesel - Personenkraftwagen (Kategorie M ₁ ^{1,2})								
Gesetzgebungsstufe	Einführungsdatum	CO	HC	NMHC	HC+NO _x	NO _x	PM ³	PM ⁴
		g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	#/km
Euro 1	Jul. 1992	2.72	-	-	0.97	-	0.14	-
Euro 2 ^b	Jan. 1996	1	-	-	0.7	-	0.08	-
Euro 3	Jan. 2000	0.64	-	-	0.56	0.5	0,05	-
Euro 4	Jan. 2005	0.5	-	-	0.3	0.25	0,025	-
Euro 5 ^b	Sep 2009	0.5	-	-	0.23	0.18	0.005	6E11
Euro 6	Sep. 2014	0.5	-	-	0.17	0.08	0.005	6E11

Auffällig ist die deutliche Absenkung der Partikelwerte von Euro4 auf Euro5, die den Einbau des DPF erforderte.

Die Halbierung der NO_x Werte von Euro5 auf Euro6 erzwingt Abgasnachbehandlungssysteme für Stickoxyde.

Zusammenhang zwischen Verbrauch, Ruß und NOx über den Förderbeginn

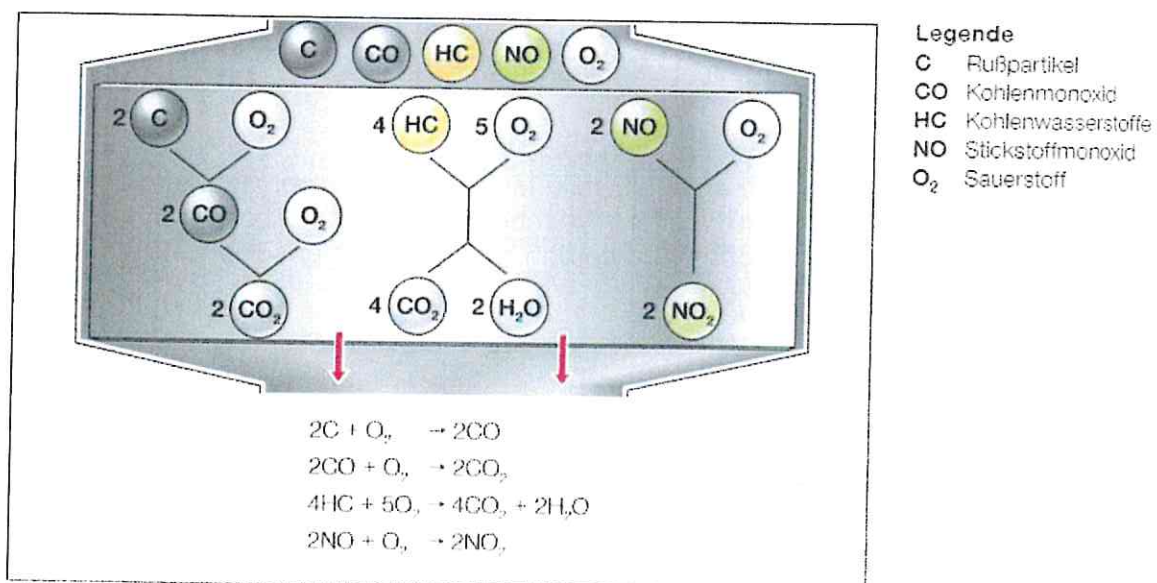


(HC und CO verhalten sich der Ruß Kennlinie ähnlich)

blau = Verbrauchs- und Leistungsoptimiert (so werden Motoren eingestellt, dafür NOx Nachbehandlungssysteme)
 rot = NOx Optimiert

Diesel Oxidationskatalysator (engl. DOC)

- Gleicher Aufbau wie beim Katalysator für Ottomotoren.
- Keramik- oder Metallträger mit aufgerauter Oberfläche aus Aluminiumoxid, dem sogenannten Wash-Coat.
- Beschichtet mit ein bis zwei Gramm Platin.
- Umwandlungsvorgänge: (nur Oxidation / 2 Wege-Kat / keine Reduktion von NOx wegen zu hohem O₂ Anteil im Abgas aber Wandlung von NO in NO₂)
 - CO in CO₂,
 - HC in CO₂ und H₂O.
 - NO in NO₂ (für FZ mit DPF)
- Der hohe Sauerstoffgehalt im Abgas lässt die Umwandlung ab ca. 170 -200°C zu. Die Umwandlung entspricht hier ca. 50-90%. Man spricht von „Light-off-Temperatur“
- **Bei Fahrzeugen mit Partikelfilter bzw. SCR- Katalysator hat der Oxidationskatalysator eine zusätzliche Aufgabe:**
Er wandelt ankommendes NO (Stickstoffmonoxid) in NO₂ (Stickstoffdioxid) um.
- NO₂ senkt die Zündtemperatur von Rußpartikeln (Partikelbrenntemperatur) und fördert so die natürliche Regeneration (auch passive Regeneration genannt) der Rußpartikel in den folgenden Komponenten.
- Reduktion der Partikelmasse. HC- (Kohlenwasserstoffe) Verbindungen im Partikel spalten sich ab. Dadurch verringert sich die Partikelmasse (PM) um ca. 15-30%



Abgasnachbehandlung im Dieseloxidationskatalysator

Grundlagen Dieseloxidationskatalysator DOC

Dieseloxidationskatalysatoren setzen – vereinfacht ausgedrückt – die schädlichen Abgasbestandteile durch eine Verbindung mit Sauerstoff O₂ zu unschädlichen Stoffen um.

Der Dieseloxidationskatalysator besteht aus einem Trägerkörper aus Metall oder Keramik, der sich aus wabenförmigen Modulen mit großer Oberfläche zusammensetzt. Die Oberfläche der Waben ist mit einer katalytisch wirkenden Substanz – in der Regel ein Edelmetall wie Platin beschichtet.

Der Dieseloxidationskatalysator ist in das Schalldämpfergehäuse der Abgasanlage integriert und benötigt für einwandfrei es Funktionieren schwefelarmen Dieseldieselkraftstoff mit maximal 0,05 Vol.-% Schwefel.

Dieseloxidationskatalysatoren werden im Fahrzeug meist nah am Motor eingebaut, damit sie schnell die für eine möglichst effiziente Funktion nötige Temperatur erreichen.

Katalytische Beschichtung

Beim Durchströmen der Abgase bewirkt die katalytische Beschichtung der Module chemische Reaktionen der schädlichen Abgasbestandteile mit Sauerstoff. Kohlenmonoxid CO wird zu Kohlendioxid CO₂ oxidiert und Kohlenwasserstoff HC zu Kohlendioxid CO₂ und Wasserdampf H₂O. Der Anteil an unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid in den Abgasen kann so um 80 bis 90 % verringert werden

Zudem sind Dieseloxidationskatalysatoren in der Lage, das im Abgas vorkommende Stickstoffmonoxid NO zu Stickstoffdioxid NO₂ zu oxidieren. Bei diesem Gas handelt es sich zwar auch um einen Schadstoff, aber dieser kann in einem nachfolgenden Prozess z.B. beim SCR-System in Kohlendioxid CO₂ und molekularen Stickstoff N₂ umgewandelt werden. (ein Element das zu ca. 78 % Bestandteil der normalen Umgebungsluft ist.)

Der typische Diesel-Abgasgeruch wird ebenfalls größtenteils unterdrückt. Außerdem verringern sich die Abgastrübung und der Ausstoß von Partikeln um etwa 15 %. Der Anteil an Stickoxiden NO_x wird nicht vermindert.

Weitere Komponenten zur Abgasnachbehandlung

Weil Dieseloxidationskatalysatoren den Partikelanteil im Abgas nur zu einem geringen Teil vermindern können, ist eine weitere Nachbehandlung des Abgases notwendig, wenn strenge Grenzwerte eingehalten werden sollen. Meist geschieht dies mithilfe eines „nachgeschalteten“ Partikelfilters.

Dieselpartikelfilter (DPF)

Partikel und Feinstaub

Als Partikel oder Staub werden alle in der Umgebungsluft verteilten Feststoffe bezeichnet. Feinstaub PM (Particulate Matter) setzt sich aus ultrakleinen Partikeln mit einem Durchmesser $< 10 \mu\text{m}$ (PM10) zusammen. Da die Mikropartikel ein gesundheitliches Risiko darstellen, hat die EU eine Richtlinie (gültig seit 2005) mit Höchstwerten für die Feinstaubbelastung beschlossen.

Bei den durch die Verbrennung im Dieselmotor entstehenden Partikeln handelt es sich um Rußpartikel C, Asche und unverbrannten Kohlenwasserstoff. Im Zusammenhang mit der Belastung durch Feinstaub steht vor allem die Reduzierung der Rußpartikel im Vordergrund.

Zündtemperatur der Rußpartikel ca. 550°C und wird zu CO^2 verbrannt.

Dieselußpartikelfilter DPF

Ein Dieselußpartikelfilter DPF zur Abgasnachbehandlung verringert die Partikelemission.

Es wird unterschieden in:

- Geschlossene Systeme / Vollstromfilter, bei denen das Abgas eine poröse Filterwand durchdringt.

(Erstausrüstung)

(Abscheidegrad über 90 %)

- Offene Systeme / Teilstromfilter, bei denen das Abgas den Filter durchfließt.

(Nachrüstung)

(geforderter Abscheidegrad nur über 50 %)

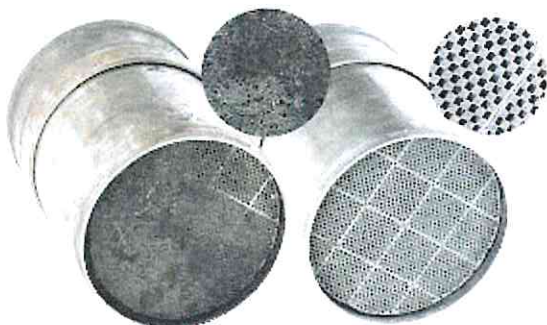
- zu wartendes System, bei denen ein Additiv eingefüllt werden muß.

(Partikelbrenntemperatur wird um ca. 100°C herabgesetzt)

Wartungsfreies System, bei denen die Regeneration ohne Additiv erfolgt.

(Abgastemperatur am Filtereintritt wird auf 630°C angehoben)

Vollstromfilter- Partikelfilter



- Filtermaterial:
 - Siliziumcarbid
 - Sintermetall
- Gasförmige Abgasbestandteile müssen das Filtermaterial durchdringen. Dabei bleiben feste Bestandteile wie Ruß, Metallabrieb, Öl-, Kraftstoff- und Additivrückstände haften.
- mit zunehmender Beladung erhöht sich der Abgasgegendruck welcher von Differenzdrucksensoren erfasst wird. Im Steuergerät sind Kennlinien mit Sollwerten für einen defekten, einen sauberen und einen beladenen Filter abgelegt.
- Die Beladung des Filters wird vom Steuergerät nach zwei Modellen berechnet:
 - 1) Differenzdruck / Staudruck wird vor und nach DPF gemessen. Über den Druckunterschied und die durchgesetzte Abgasmasse (die aus der angesaugten Luftmasse und der eingespritzten Kraftstoffmasse berechnet wird) kann man die Beladung des DPF ermitteln.
 - 2) zusätzlich wird aus dem Fahrprofil (Motorlast, Drehzahl, Abgastemperatur und ggf. Breitband- Lambdasonde) die erzeugte Rußmasse berechnet.
- Wenn nach einer Modellrechnung die Beladungsgrenze des DPF erreicht ist, versucht das Steuergerät eine Regeneration einzuleiten.
- Bei günstigen Bedingungen kann die Regeneration auch früher eingeleitet werden.

Regenerierung

Bei einer Regenerierung werden die Rußpartikel zu Kohlendioxid (CO₂) verbrannt. Rußpartikel haben eine Zündtemperatur von etwa 600 Grad Celsius (°C).

Man unterscheidet zwischen:

- Passive / natürlicher Regenerierung, (Hinweis NO₂, siehe Oxikat)
- Aktive Regenerierung
- Werkstattregenerierung.

Passive Regenerierung: Vollastfahrt, hohe Abgastemperatur, die Rußpartikel brennen selbstständig ab.

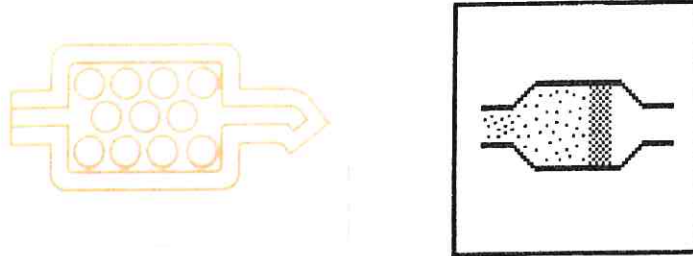
Aktive Regenerierung: AGR aus, Drosseln oder Heizen der Ansaugluft, Glühanlage an, Nacheinspritzung früh, Kat meldet Betriebstemperatur, Nacheinspritzung spät, Kraftstoff gelangt in den Kat und reagiert mit Sauerstoff, die entstehende Temperatur zündet die Partikel im DPF.

Werkstattregenerierung: Einleiten der Regeneration mit dem Werkstatttester.

Filterregenerierung

Bei Fahrten im unteren Lastzustand (Stadtverkehr) werden die nötigen Temperaturen nicht erreicht oder der Regenerationsvorgang durch Abstellen des Motors abgebrochen.

Der Partikelfilter setzt sich zu und es kommt zu einem erhöhten Abgasgedruck.
Der Fahrer wird über eine Kontrolllampe gewarnt.



Entweder muss laut Bedienungsanleitung eine bestimmte Strecke mit Mindestgeschwindigkeit gefahren werden.

Oder der Regenerationsvorgang wird mit dem Werkstatttester eingeleitet.

Voraussetzung ist das der Filter die Servicegrenze noch nicht überschritten hat.

Je nach Fahrzeugtyp kann der Vorgang bei stehendem Fahrzeug oder nur bei der Fahrt eingeleitet werden.

Additivgestützte Systeme

- Durch Additive wird die Zündtemperatur auf ungefähr 450 °C bis 500 °C abgesenkt.
- Nach jedem Tankvorgang wird aus einem Additivtank eine entsprechende Additivmenge mit einer Förderpumpe über eine Einspritzdüse dem Kraftstoff beigemischt.
- Das Additiv besteht entweder aus einer Cerium- (CE, Metall der seltenen Erden) oder einer Eisen-Kohlenstoffverbindung.
- Das Additiv verbindet sich während der Verbrennung mit den Rußpartikeln.
- **Vorteile:**
 - Frühere natürliche Regenerierung.
 - Erzwungene Regenerierung benötigt weniger Kraftstoff zum Aufheizen des DPF.
- **Nachteil:**
 - Die Additivflasche verstopft den Filter früher.

Katalytisch beschichtete Partikelfilter

Beim katalytisch beschichteter DPF sind Oxikat und DPF zu einem Bauteil zusammengefasst.

In der vorderen Zone ist ein höherer Platinanteil verteilt.

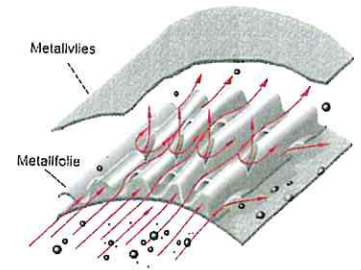
In der hinteren Zone sammeln sich Ruß, Asche und Metallabrieb.

Somit ist auch hier die Lebensdauer begrenzt.

Nach einem Beladungsmodell rechnet das Steuergerät den Ascheanteil im Filter hoch.

Ab einer berechneten Aschemasse muss der Filter ersetzt werden.

Teilstrom-Partikelfilter (offenes System, Nachrüstsystem)



Die gesamte Abgasmenge durchströmt die Filtereinheit, aber nicht das Filtermedium. Nur ein Teil des Abgases wird umgelenkt und dabei gefiltert. Der restliche Teil strömt ungefiltert vorbei.

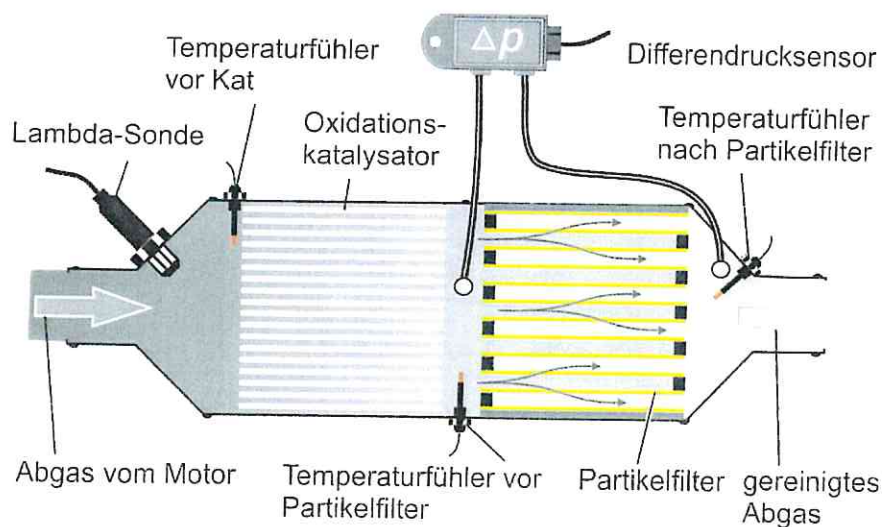
Offene Filtersysteme erreichen aus diesem Grund nur einen Abscheidegrad von 30 bis 80 %.

Weiterer Nachteil ist, dass bei zunehmender Beladung des Filters immer mehr Abgase den Filter ungefiltert passieren.

Allerdings kann sich das offene System nicht zusetzen und der Abgasgedruck bleibt relativ konstant. Diese Systeme bieten sich für Filternachrüstungen (Retrofit-Filter) an.

Sensoren bei Partikelfiltern

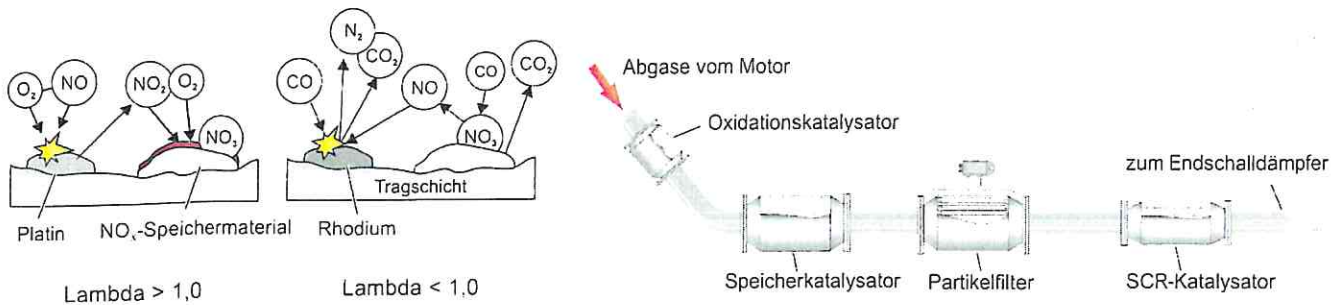
- Vollstrom-Partikelfilter benötigen Sensoren um die Funktion zu erhalten.
- Zudem verlangt Euro 6 eine schärfere Kontrolle des DPF.
- Dazu sind eingebaut:
 - Temperaturfühler vor Kat, zwischen Kat und DPF sowie nach DPF.
 - Sie überwachen die Temperaturen für die Regeneration.
 - Breiband-Lambda-Sonde, sorgt für ausreichend Sauerstoff während der Regeneration.
 - Differenzdrucksensor oder Abgasgedrucksensor oder beides, Überwachen die Beladung mit Ruß und Asche.
 - Rußpartikelsensor^(*), stellt einen zu hohen Rußausstoß fest.



^(*) auf einer Platine verändern die leitenden Partikel den elektrischen Widerstand zwischen zwei Elektroden.

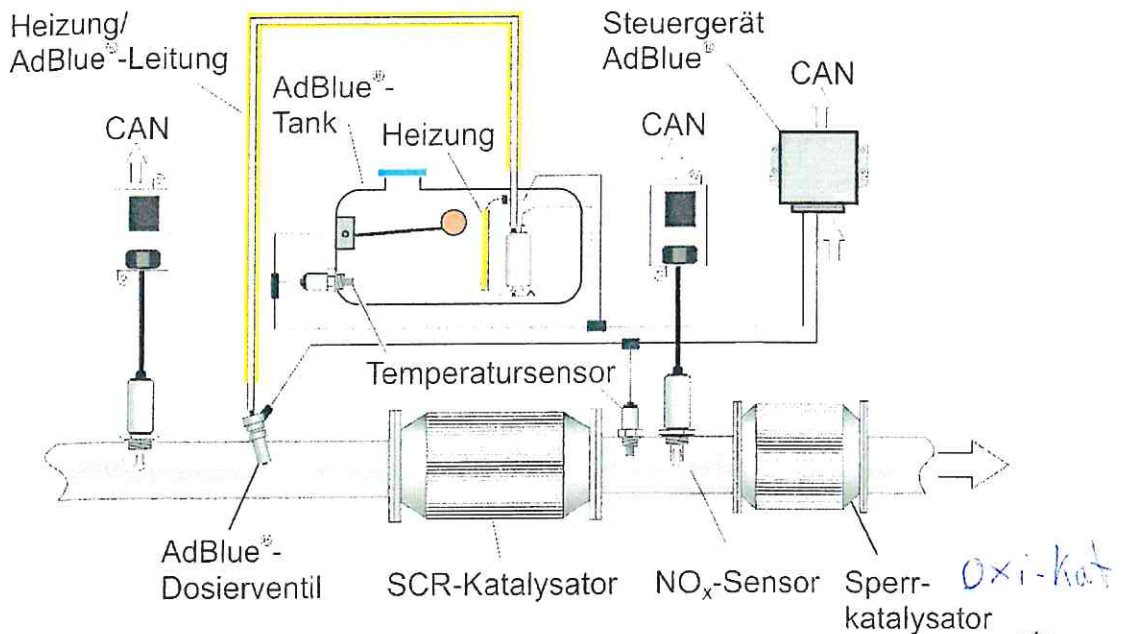
NO_x-Speicherkatalysator (NSK / NO_x Speicher Kat) (NSC / (engl. NO_x Storage Catalyst))

- Senkt den NO_x- Ausstoß um 50 bis 80 %.
- Speichert NO als Nitrat (NO₃), arbeitet wie beim Benziner nur im Temperaturfenster zwischen 250 und 450°C.
- Speichermaterial Bariumcarbonat (BaCO₃).
- Zur Regeneration wird mit Nacheinspritzungen ein „fetter“ Gemischzustand hergestellt und mit Hilfe des CO und HC das angelagerte NO₃ reduziert.
- Kombination von NSK und SCR-Kat ohne die Verwendung von AdBlue®.
 - Hier entsteht im „Fettbetrieb“ NH₃.
 - Dieses Ammoniak reduziert im SCR-Kat wirksam den NO-Ausstoß.



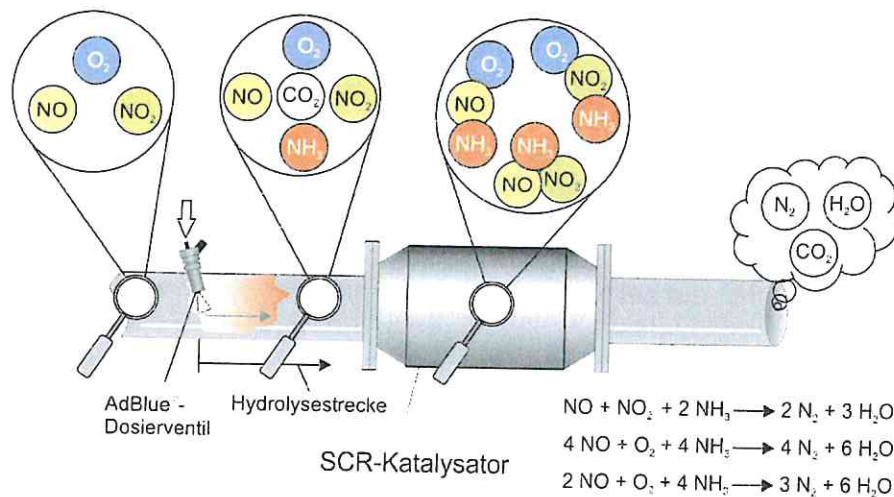
SCR-Katalysator

- SCR ist eine englische Abkürzung und steht für Selective Catalytic Reduction (selektive katalytische Reduktion).
- Der SCR-Kat benötigt ein Reaktionsmittel (AdBlue®).
- Es wird in einem eigenen Tank mitgeführt.
- AdBlue® gefriert ab -11°C und muss deshalb beheizt werden.
- AdBlue® ist eine wässrige Harnstofflösung mit einer Konzentration von 32,5%.
- Der Verbrauch liegt bei bis zu 5 % des Kraftstoffverbrauchs.

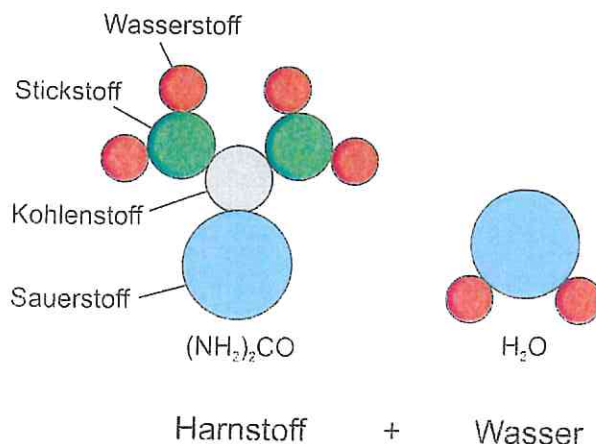


Reaktionen im SCR-Katalysator

- AdBlue® wird in den Abgastrakt eingedüst.
- Mindestens 200°C sind dazu erforderlich.
- AdBlue® hydrolysiert zu Ammoniak (NH₃) und Wasser.
- NH₃ lagert sich an den Zeolithen an.
- NO und NO₂ im Abgas treffen auf das gespeicherte NH₃.
- Der Wasserstoff (H) reagiert mit dem Sauerstoff (O) des NO_x.
- Bis zu 90% des NO_x wird abgebaut.
- Vielfach wird, um NH₃ Durchbrüche zu vermeiden, hinter dem SCR-Kat noch ein NH₃-Schlupf-Kat eingebaut.
Dort kann auch CO aus der DPF-Regeneration gemindert werden.



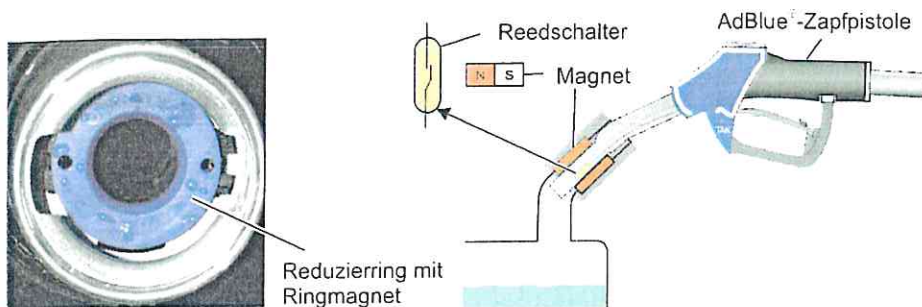
- AdBlue® ist eine international eingesetzte Produktbezeichnung für eine Harnstofflösung, die von der Mineralölwirtschaft, der chemischen Industrie und der Fahrzeughersteller kreiert wurde und eine hochreine, 32,5-prozentige, wässrige Harnstofflösung.
- Ist ungiftig, geruchlos, klar und basisch.
- Gefriert ab -11°C.
- Ist sehr kriechfähig und kristallisiert bei Trocknung.



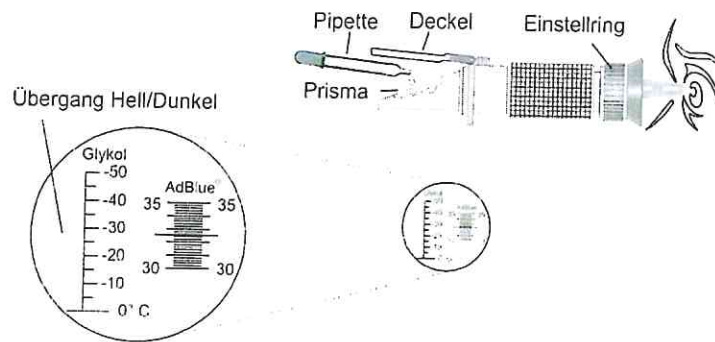
AdBlue® (Reagenz)

Da AdBlue® ungiftig ist, ist der Umgang mit der wässrigen Lösung recht unproblematisch. Allerdings sollten die folgenden Hinweise beachtet werden, wobei kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird:

- Kommt das Mittel mit Aluminium in Kontakt, erfolgt eine Reaktion an der Oberfläche, die zur optischen Beeinträchtigung führt.
- Bei Kontakt mit Lacken, insbesondere bei einschichtige Lackierungen, kann es ebenfalls zu einer Beeinträchtigung der Optik/Oberfläche kommen
- Beim Umgang mit AdBlue® ist die persönliche Schutzausrüstung zu tragen
- Benetzte Kleidung ist sofort zu entfernen, Hautflächen mit Wasser zu reinigen
- die Vorgaben der Fahrzeughersteller und die gültigen Sicherheitsdatenblätter, die weitere Informationen enthalten, sind zu beachten.
- Zur Vermeidung von Kristallausscheidungen ist eine Lagerung des Mittels bei Normalbedingungen (25 °C) zu empfehlen.



- AdBlue® Tanks in Kraftfahrzeugen sind aus Kunststoff oder
- Edelstahl (NFZ).
- Die Einfüllstutzen sind bei aktuellen Fahrzeugen gut sichtbar eingebaut, bei älteren Fahrzeugen auch im Kofferraum.
- Nachgetankt werden kann an der Tankstelle oder mit Plastikkanistern.
- Tanken an der Tankstelle mit Zapfpistole erfordert einen Magnetring im Einfüllstutzen.

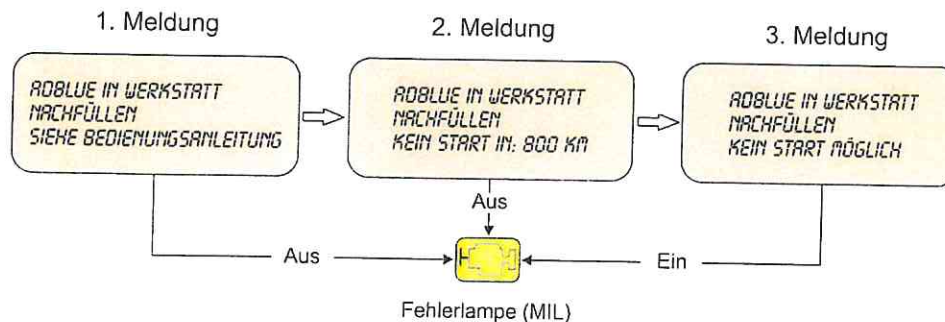


- Prüfen der AdBlue® Konzentration mit dem Refraktometer:
- Weiterhin kann das Reagenz mit einem Ölteststreifen auf Verschmutzung mit Diesel oder Öl geprüft werden.
- Mit Hilfe des Werkstatttesters kann eine Dosiermengenprüfung durchgeführt werden.

Der Gesetzgeber fordert bei NO_x-Abgasnachbehandlungssystemen eine NO_x-Kontrolle.

Das Meldungskonzept gliedert sich in folgende Bereiche (Beispiel):

- Füllstand
- Falsches Medium
- Abweichender Verbrauch ($\pm 50\%$)
- NO_x-Fehler und Nachfüllergebnis



- Werden die Warnungen ignoriert ist nach Ablauf der gefahrenen Strecke kein Start mehr möglich.
- Es muss erst eine Mindestmenge AdBlue® nachgefüllt werden und ggf. das Steuergerät entsperrt werden.
- Misst das System über den AdBlue®-Qualitätssensor eine mangelhafte Konzentration so kann die Restlaufstrecke auf 50 Kilometer begrenzt werden.
- Bei (NKW) werden Vorratsbehälter eingebaut, die eine Reichweite von bis zu 10.000 km erlauben.
- Der Füllstand wird über eine Tankuhr angezeigt.
- Liegt ein Fehler im System vor:
 - Wird das Motordrehmoment stark reduziert.
 - Ein permanenter (nicht löscharer) Fehler wird gesetzt.
 - Bei PKW beträgt die Speicherdauer 800 Tage oder 30.000 Kilometer
 - Bei NFZ 400 Tage oder 9.600 Betriebsstunden.

