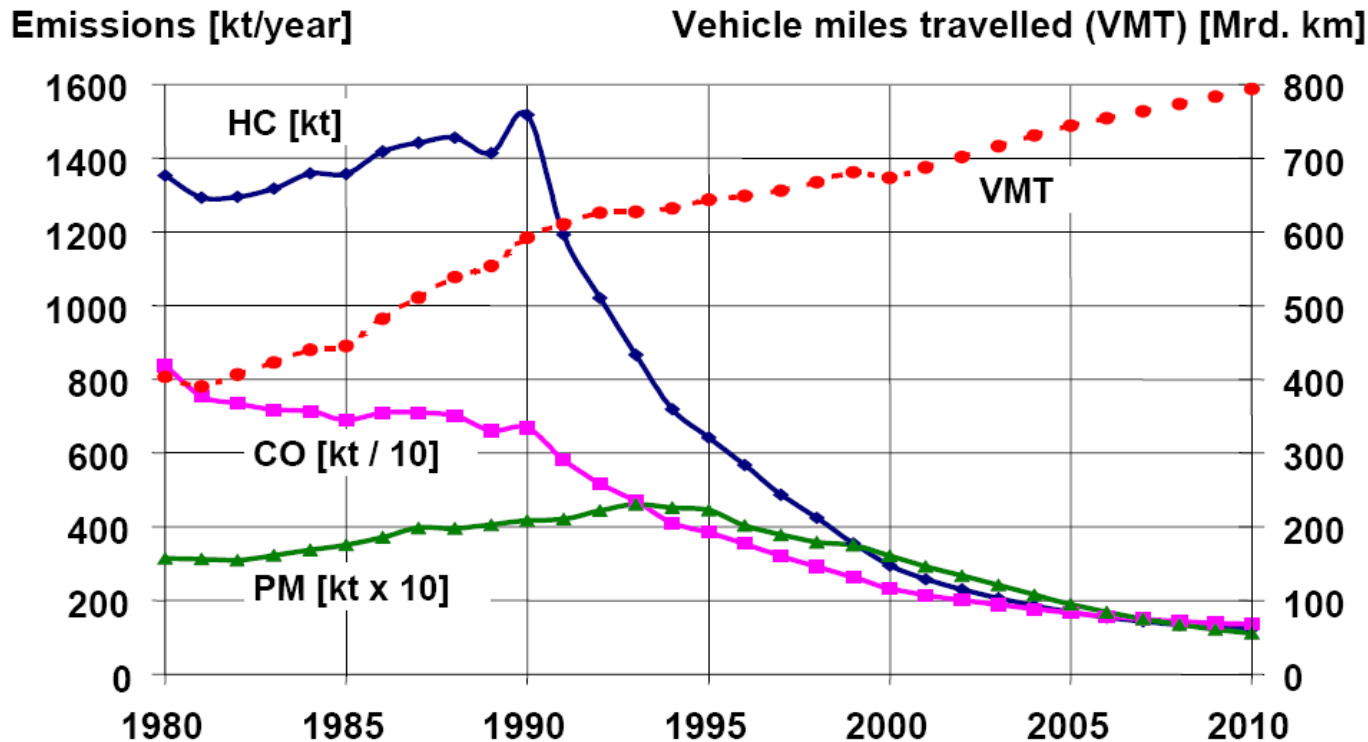


Kolben- und Strömungsmaschinen

Praktikum 7: Abgasnachbehandlung

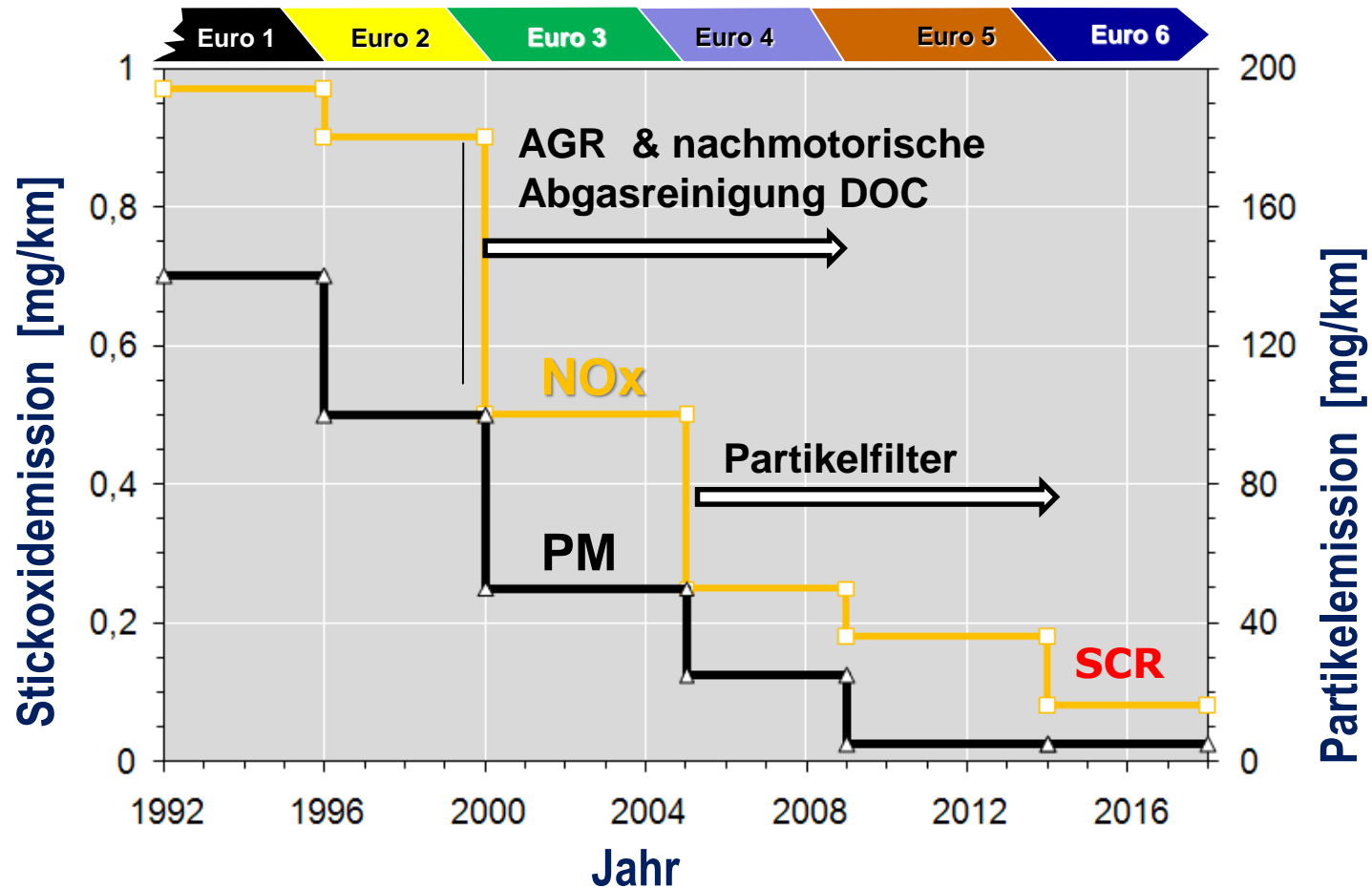
Progress of emission reduction in Germany



CTI Forum Exhaust Systems



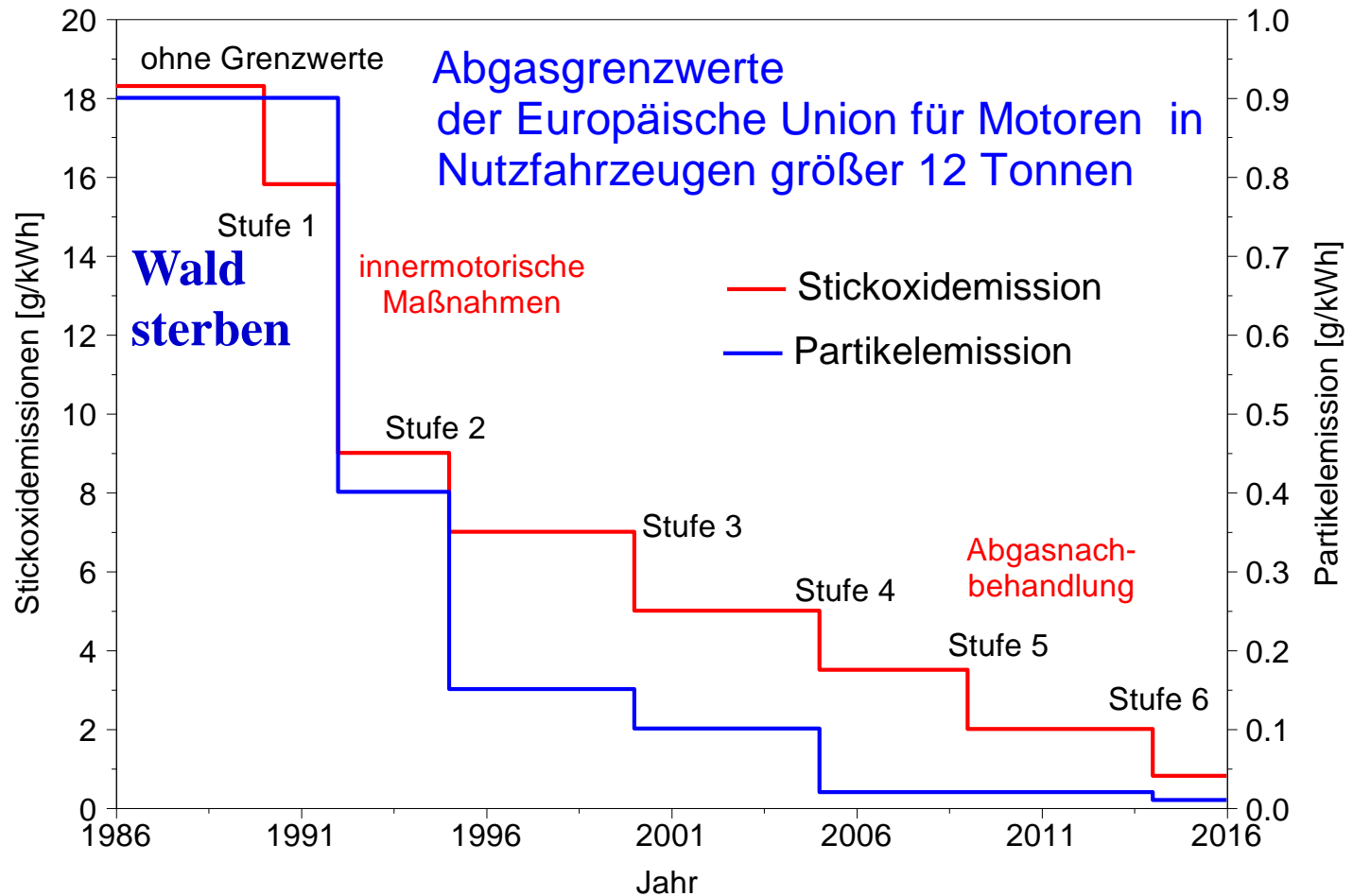
Ziele der Abgasnachbehandlung - durch die Gesellschaft definiert EU-Vorschriften für PKW mit Dieselmotor



Gesetzliche Emissionsvorschriften = Treiber der Motorenentwicklung

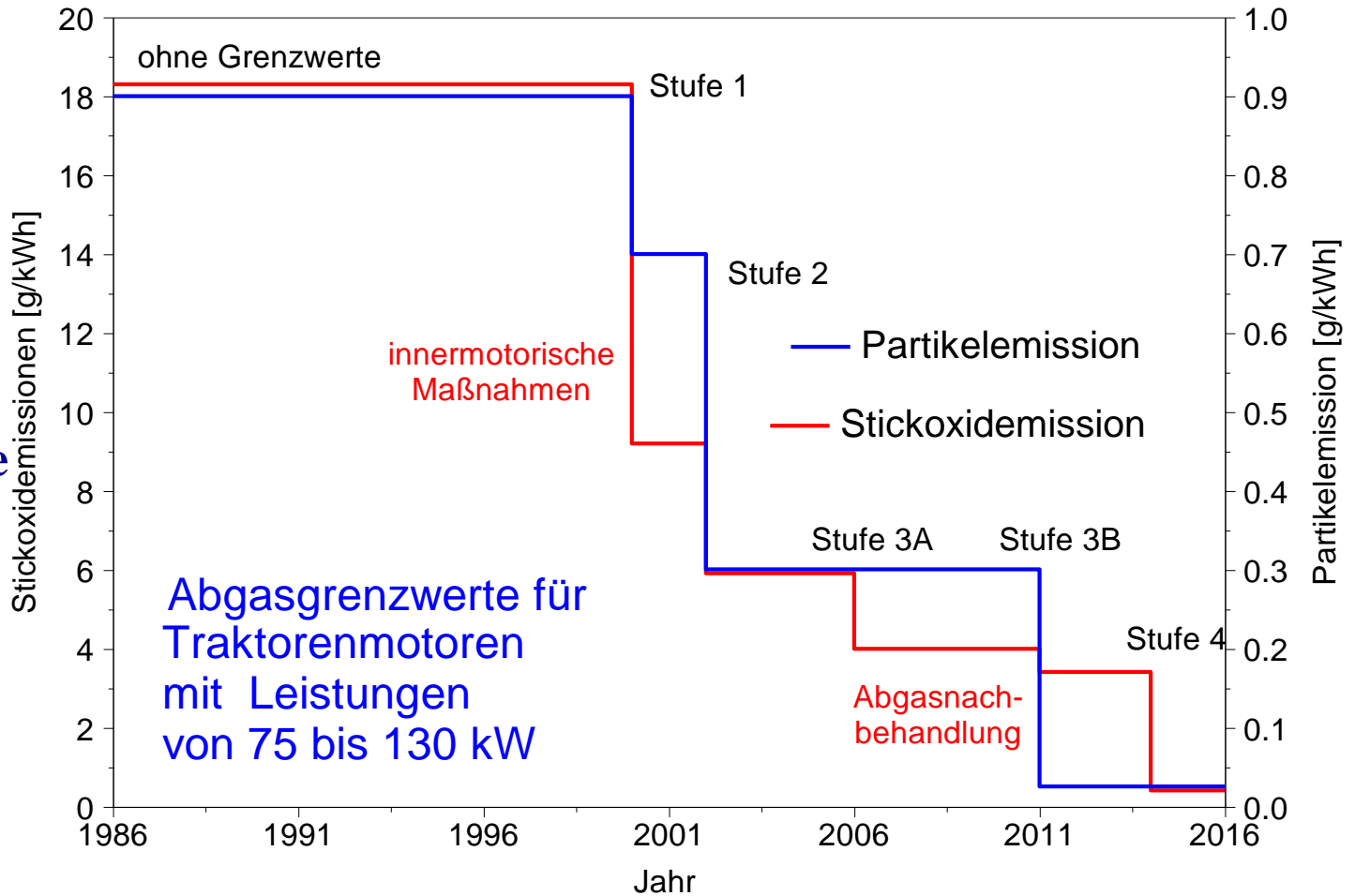
Ziele der Abgasnachbehandlung - durch die Gesellschaft definiert EU-Vorschriften für Nutzfahrzeuge größer 12 Tonnen

**Die Abgas-
grenzwerte
sind derzeit
Treiber
der Motoren-
entwicklung!**



Ziele der Abgasnachbehandlung - durch die Gesellschaft definiert

Motorenarten mit geringen Stückzahlen Traktoren / Bahn

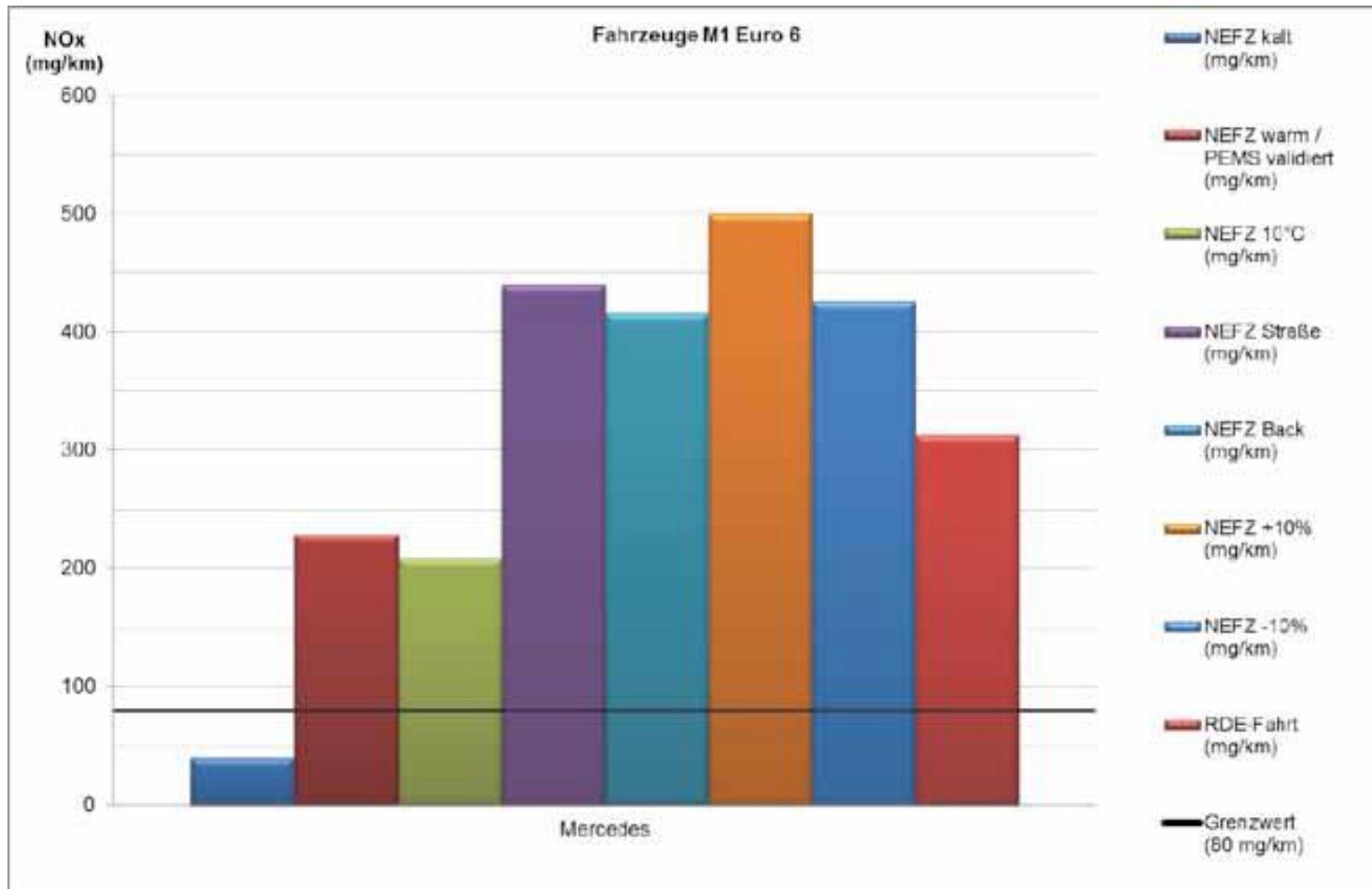


Spätere
Einführung der
Grenzwerte

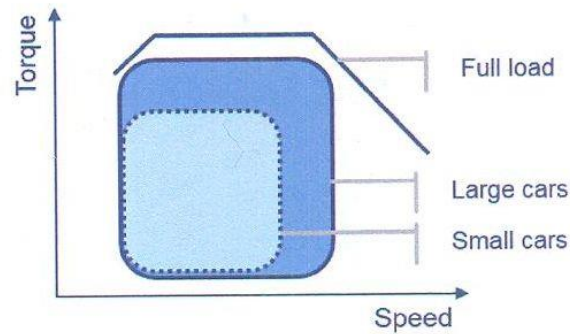
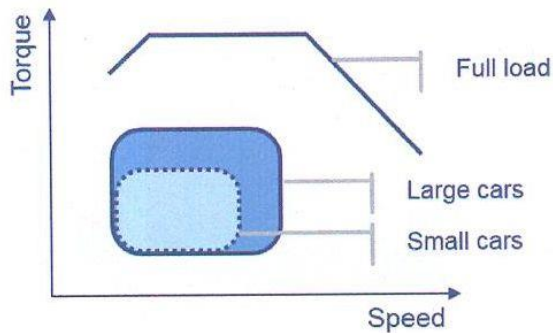
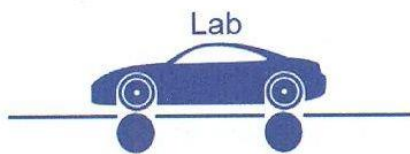
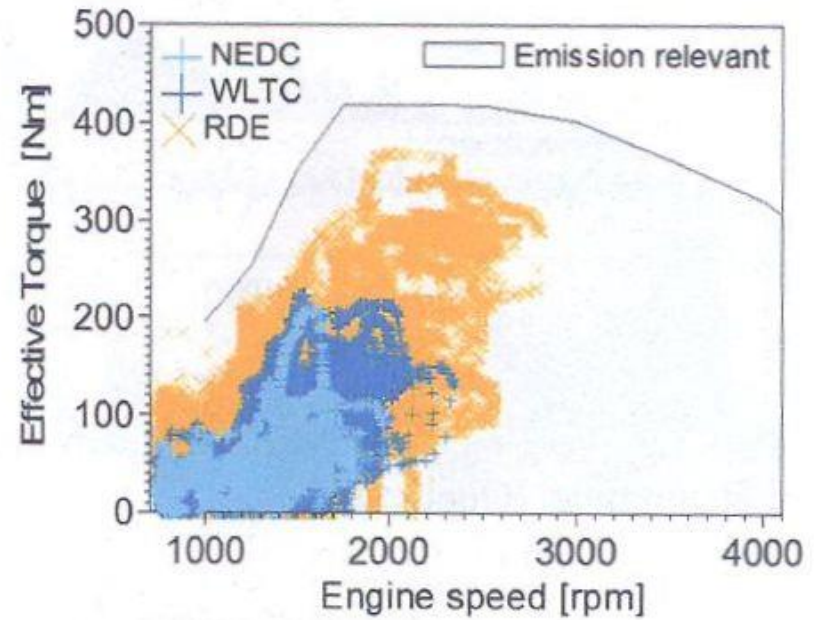
2016 fast gleiche
Anforderungen

Abgasgrenzwerte für
Traktorenmotoren
mit Leistungen
von 75 bis 130 kW

Mercedes Euro 6: VITO 2,5 Liter Hubraum Stickoxidreduzierung über SCR System mit AD-BLUE (teure Variante)



Quelle: IAV Fachbuch RDE



10. Messvorschriften PKW - Motoren RDE 1

Prüfzyklus **NEFZ-PKW** war von **1988**, Widerspiegelte nicht exakt genug die Praxis. Test für Autos mit geringer Leistung z.B. Ente Fiat 500.

LKW und Traktoren haben 2010 für 2014 den NRTRC oder WHTC erhalten, der wesentlich härter zu bestehen ist.

Beispiel Traktor 2000 ohne Vorschrift, 2001 bis 2014 8 Punkte Test stationär, ab 2014 NRTC

Weil die PKW in Praxis nicht sauberer wurden (2008 bis 2014) wurde auf Druck der Öffentlichkeit der RDE Test eingeführt.

Verordnung 2016/427 der EU definiert den RDE Test.

98 Seiten Text mit Vorgaben

Messzyklen

Messgeräte Bewertungen

10. Messvorschriften PKW - OTTO-Motoren RDE 2

RDE Test

- kein Prüfstandstest
- Straßentest auf realer Straße
- Kein Test mit Beutel
- Hauptsächlich für Stickoxide
- Neue Messgeräte erforderlich → transportabel → PEMS

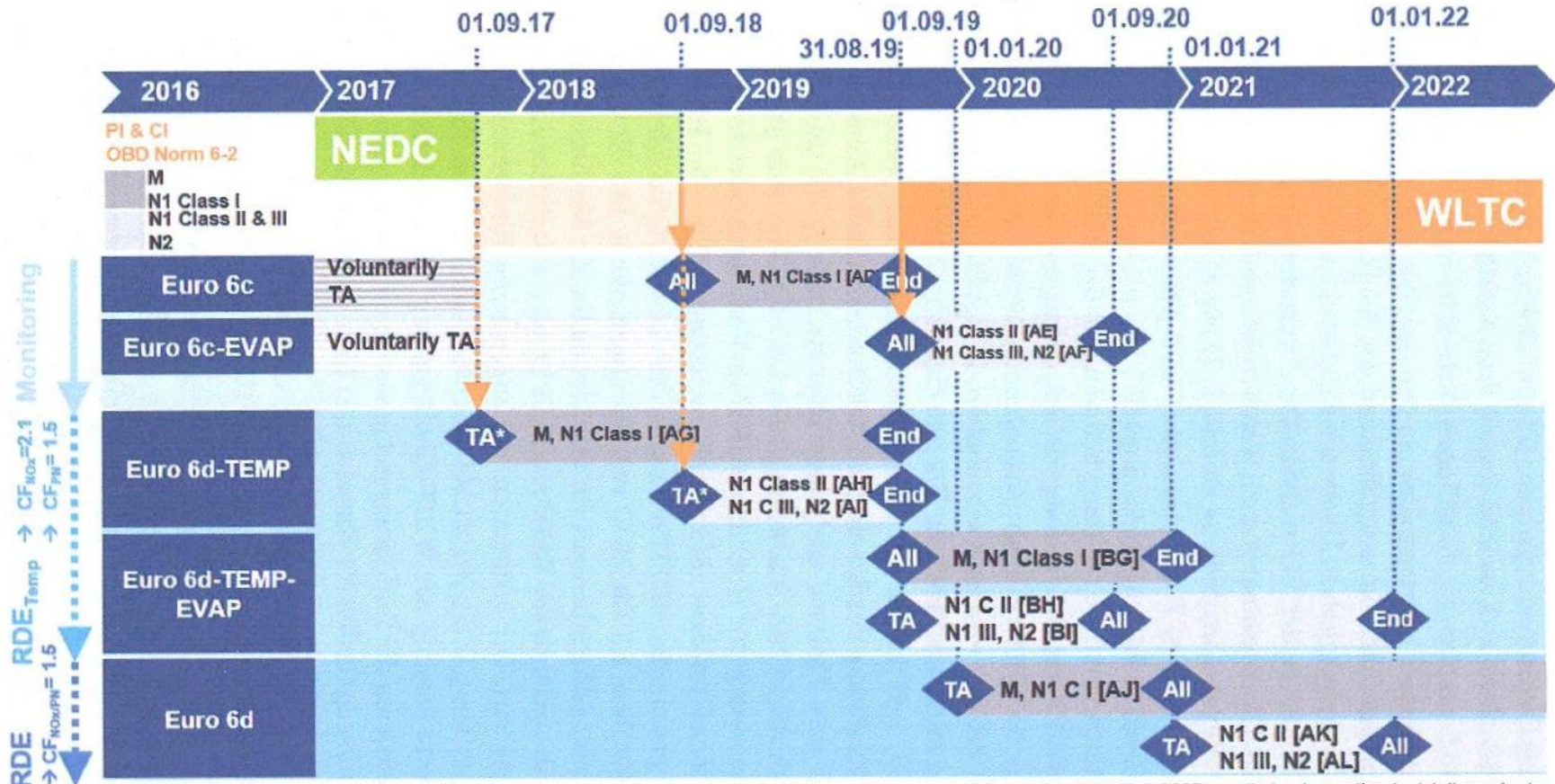
Teile sind

Stadtfahrt	Vmax 60	Vmittel 15 bis 30	mindestens 16 km
Landstraße	Vmin 60	Vmax 90	mindestens 16 km
Autobahn	Vmin 90	Vmax 145	mindestens 16 km

5 Minuten über 100 km/h

Gesamtdauer zwischen 90 und 120 km.

Kraftstoff, alle entsprechend der einzelnen Fahrzeugzulassung



(*)This limitation does not apply if a vehicle was type-approved in accordance with the requirements of Regulation (EC) 715/2007 and its implementing legislation prior to 1 September 2017 in the case of category M and N1 class I vehicles, or prior to 1 September 2018 in the case of category N1 class II and III and category N2 vehicles, according to the last sub-paragraph of Article 15(4).

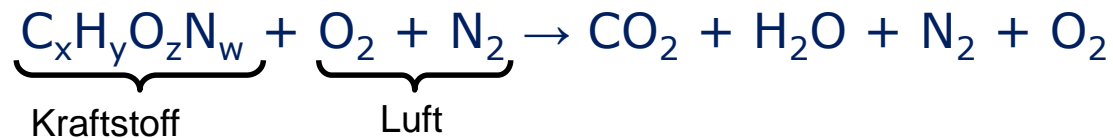
PI - petrol-injection ; CI - compression ignition

Quelle: IAV Fachbuch RDE

Verbrennung

Abgaszusammensetzung

Vollständige, ideale Verbrennung des reinen Kraftstoffs



Kraftstoffdaten - mittlere Zusammensetzung

- $C_{7,76}H_{13,1}O_0N_0$ - Benzin (Super)
- $C_{10,8}H_{18,7}O_0N_0$ - Diesel

Verbrennung

Unvollständige Verbrennung

- **CO** => extrem giftig, da 200-fache höhere Affinität zum Hämoglobin
- **NO_x** => (NO + NO₂) – Stickoxide
 - NO => starkes Blutgift, bewirkt Lähmungserscheinungen
 - NO₂ => starke Reizwirkung, Anätzung der Schleimhäute, trägt zur Entstehung von bodennahem Ozon bei, saurer Regen
- **HC/UHC** => unverbrannte Kohlenwasserstoffe, teilweise karzinogen
- **SO₂** => Schwefeldioxid (aus Kraftstoffschwefel), saurer Regen
- **Partikel** => Dieselmotor, toxisch durch angelagerte polyzyklische Aromate, karzinogen und mutagen

Entstehung der Schadstoffe

NO_x – Emissionen

- Thermisches NO_x (Zeldovich-Mechanismus)
Bildung im verbrannten Gemisch hinter der Flammenfront ab 1700 K,
hohe Temperatur unter nahezu stöchiometrischen Bedingungen mit
leichtem Luftüberschuss
- Promptes NO_x
Bildung in der Flammenfront ab 1000 K, fette Bedingungen
- Kraftstoff NO_x
Direkte Umwandlung des Brennstoffstickstoffs

CO – Emissionen

- Produkt unvollständiger Verbrennung bei Sauerstoffmangel oder zu niedrigen
Verbrennungstemperaturen

HC – Emissionen

- Unvollständige Verbrennung aufgrund niedriger Temperaturen, z.B. im
Bereich von Feuersteg und Spalten

Allgemeines

Komponenten der Abgasreinigung sind

- Katalysatoren zum Abbau der gasförmigen Schadstoffe
- Partikelfilter (oder Rußfilter) zur Filterung der feinen, festen Partikel im Abgas

Katalysatoren konvertieren die bei der Verbrennung entstehenden Schadstoffe in nicht schädliche Komponenten.

$$\textit{Konvertierungsrate} = \left(1 - \frac{\xi_A}{\xi_E} \right)$$

Katalysatoren und Partikelfilter werden im vorderen Bereich der Abgasanlage eingebaut, damit sie zügig ihre Betriebstemperatur erreichen.

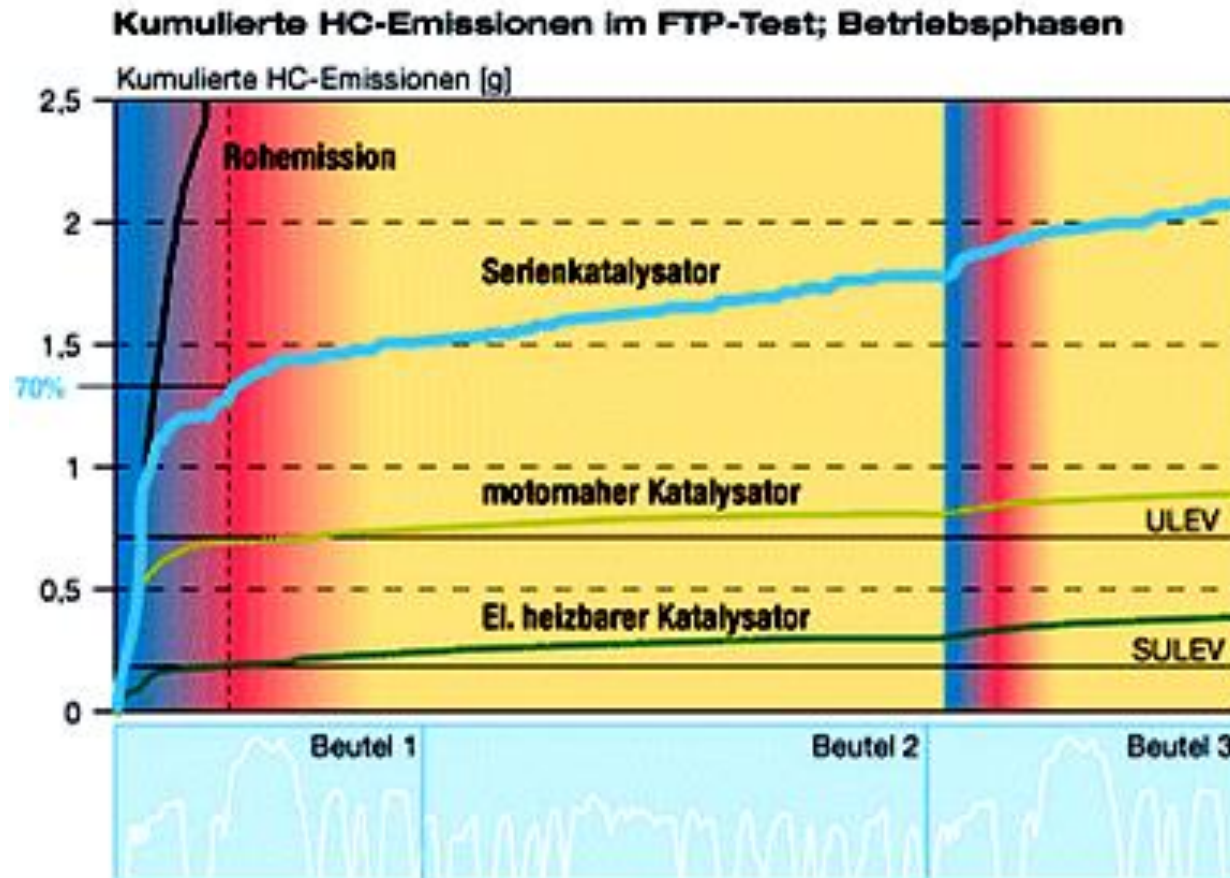
3-Wege-Katalysator

- Stand der Technik bei Motoren mit stöchiometrisch zusammengesetztem Luft-Kraftstoff-Gemisch ($\lambda=1$) → **OTTO-Motoren**
- Konvertiert
 - $\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$
 - $\text{HC} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
 - $\text{NO}_x \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
- Keramische und metallische Träger (Monolithen)
- Wirksame Oberfläche durch Trägerschicht ca. 7000-fach vergrößert
- Aktive, katalytisch wirksame Schicht enthält Edelmetalle wie Platin und/oder Palladium (Oxidation von CO, HC) und Rhodium (Reduktion von NO_x)
- Schwankungen von λ um 1 (dyn. typ. 5%) können durch die Sauerstoffeinspeicherfähigkeit des Kats ausgeglichen werden.

3-Wege-Katalysator

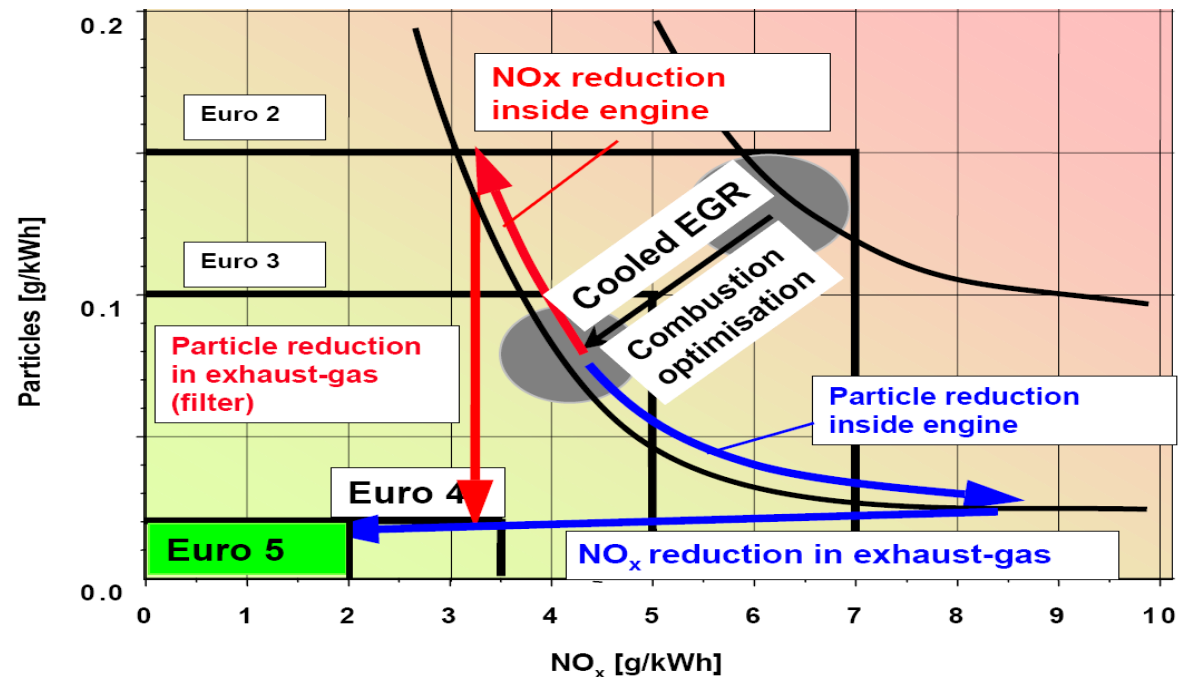
- Bei betriebswarmem Kat (400-800°C) Konvertierungsraten von >99% erreichbar
- Erreichen der Light-off Temperatur (Anspringtemperatur) ist Voraussetzung für das Einsetzen der Katalyse
- Light-off Temperatur: Abgastemperatur am Eintritt in den Kat 250°-300°C, je nach Motor und Ausrüstung zwischen 5 und 15 (30) Sekunden nach Motorstart
- während der aktuellen Abgastests wird in dieser Phase die überwiegende Masse (bis zu 80%) der zulässigen HC-Emissionen erzeugt

3-Wege-Katalysator



Dieselmotorische Verbrennung

- ⇒ hohe lokale Verbrennungsspitzen-Temperaturen bewirken hohe NO_x -Anteile
- ⇒ aufgrund der heterogenen Verbrennung und des damit verbundenen lokalen Sauerstoffmangels entsteht Ruß
- ⇒ Maßnahmen wie Abgasrückführung und hohe Einspritzdrücke können/müssen die Primäremissionen deutlich senken
- ⇒ Abgasgesetzgebung ab Euro 3 erzwingt den Einsatz von Abgasnachbehandlung
-DOC -DPF -SCR



NKW-Grenzwerte und Maßnahmen

Quelle: G.Emmerling, MAN



Abgasnachbehandlung bei Dieselmotoren

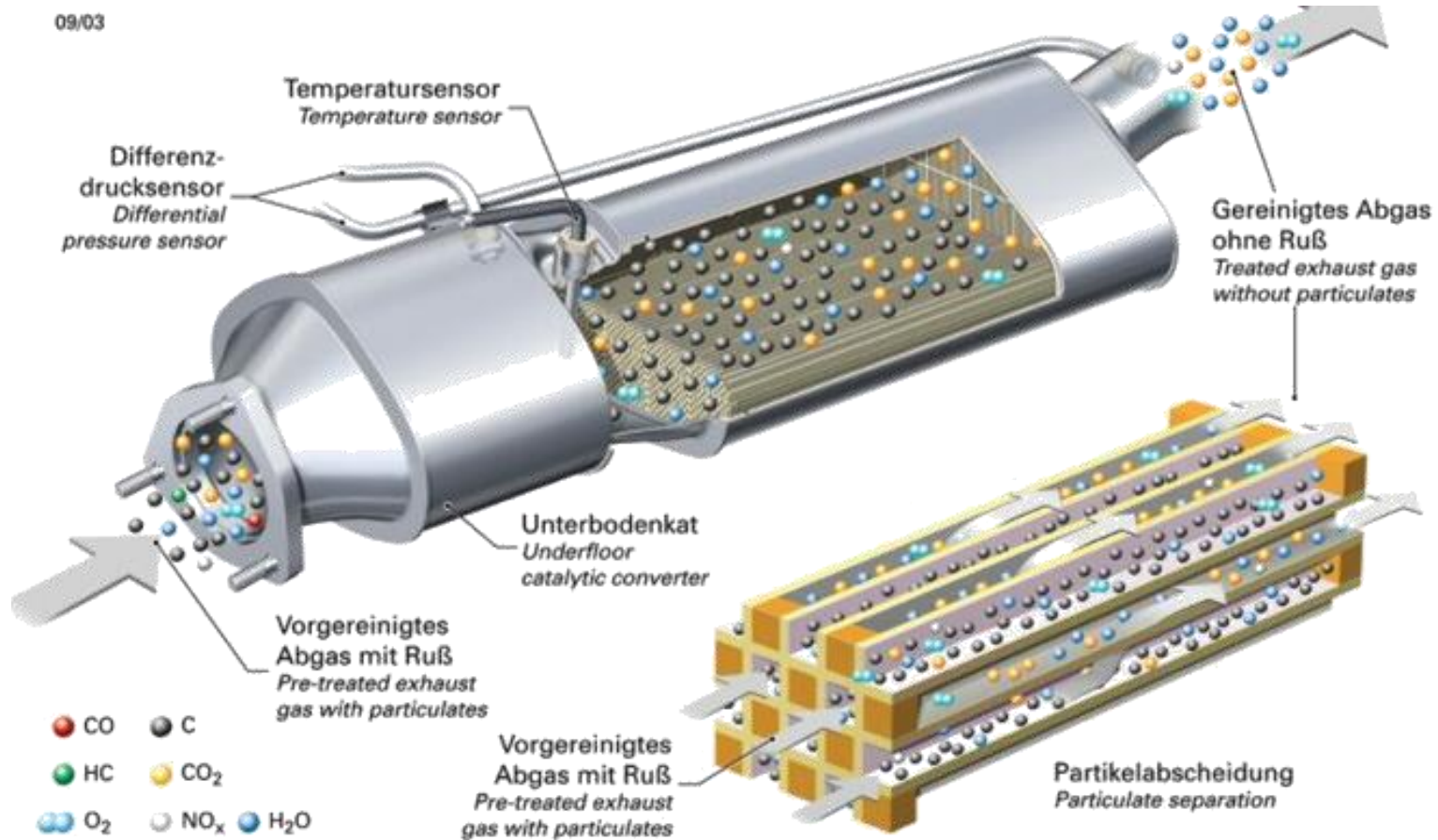
- Unbeschichtete Dieselpartikelfilter mit FBC-Additiv
- Katalytisch beschichtete Dieselpartikelfilter
- NO_x-Speicherkerats (kein Reduktionsmittel außer DK)
- SCR-Katalysatoren (Reduktionsmittel erforderlich)
- (Oxi-Kats)

Partikelfilter

- Filter aus porösen Keramiken (Corderite und Siliziumkarbit), ähnlich Keramikkatalysatoren
- Kanäle sind wechselseitig verschlossen, Abgas strömt durch die porösen Keramikwände
- Rückhaltegrade $>90\%$ für Partikel im relevanten Spektrum (10-1000 nm)
- Abgasgedruck steigt bei anwachsender Rußbelastung \Rightarrow nachteilig für Verbrauch und Fahrbarkeit, deshalb regelmäßige Regeneration notwendig
- Für Oxidation des C zu CO_2 $T > 600^\circ\text{C}$ nötig
 - \Rightarrow Problem: $T > 600^\circ\text{C}$ werden beim normalen Fahrbetrieb nicht erreicht, deshalb gesonderte Maßnahmen erforderlich

Partikelfilter

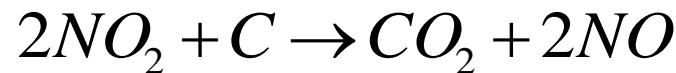
09/03



Partikelfilter

Maßnahmen zur Filter-Regenerierung

- CRT-System (Continuously Regenerating Trap)
 - ⇒ Ruß reagiert mit NO_2 bereits bei $T > 250\text{-}350^\circ\text{C}$



- ⇒ „Passive Regeneration“
- ⇒ Kein aktiver Eingriff in Motorbetrieb notwendig
- ⇒ Oxidationskatalysator stromauf des Partikelfilters erforderlich
 - $\text{NO} \rightarrow \text{NO}_2$
- ⇒ Bedingung: Massenverhältnis $\text{NO}_2/\text{Ruß} > 8:1$, i.d.R. bei NKW gegeben, schwefelarmer Kraftstoff

Partikelfilter

Maßnahmen zur Filter-Regenerierung

- **Additivsystem:**

- ⇒ Additivzugabe zum Dieselkraftstoff (10-20 ppm)
- ⇒ Additiv senkt Ruß-Oxidationstemperatur von 600°C auf ca. 450°C
- ⇒ Berechnung des Filterbeladungsgrades aus Messung des Differenzdrucks über den Filter
- ⇒ Oberhalb einer gewissen Beladung wird der Rußabbrand durch aktive Maßnahmen (Erhöhung der Abgastemperaturen durch veränderte Verbrennungsführung) eingeleitet
- ⇒ „Aktive Regeneration“
- ⇒ Verbreitet bei PKW-Anwendungen

- **Katalytische Brenner**

- ⇒ **Kraftstoff wird direkt in den Abgasstrang gegeben**
- ⇒ **Oxidation und Wärmefreisetzung an einem Oxidationkatalysator**

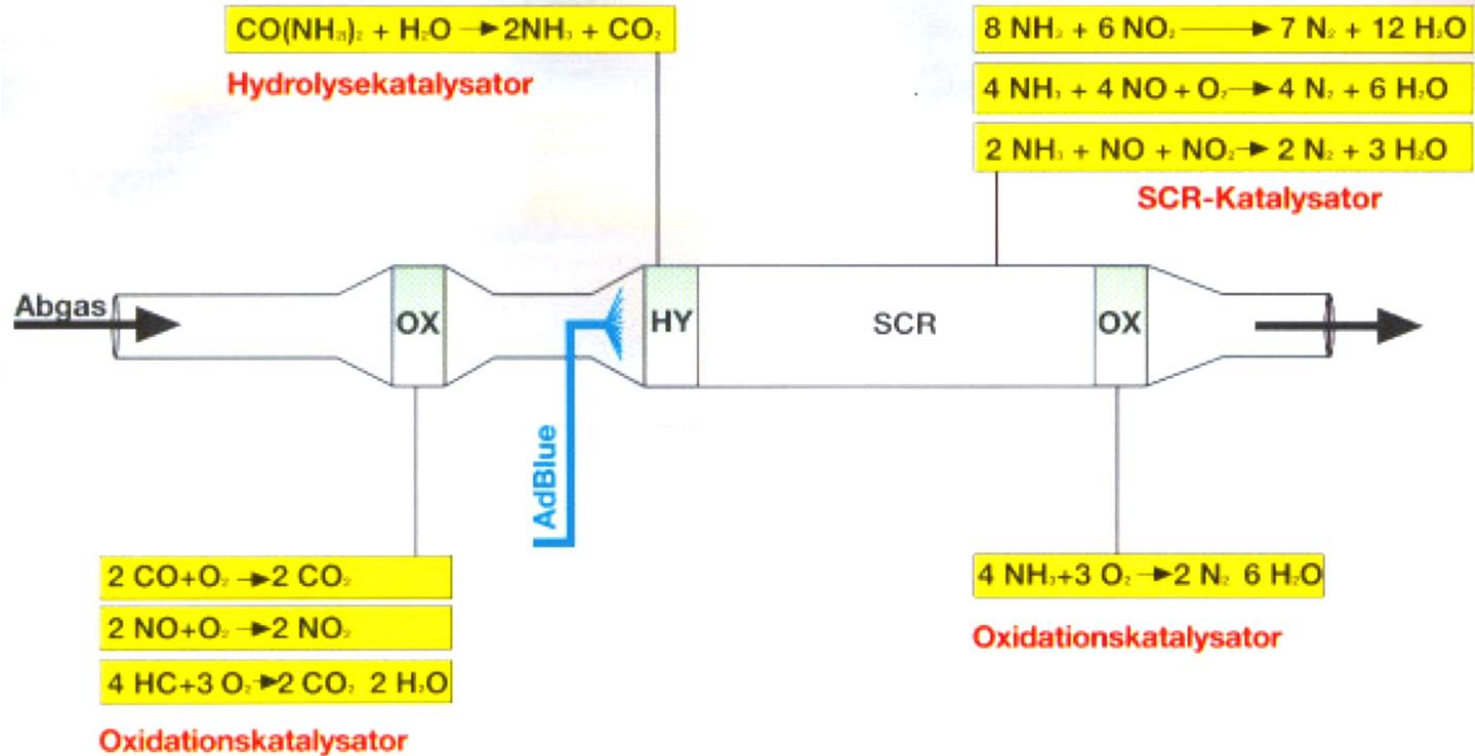
Partikelfilter

Regeneration

- Sobald Zündtemperatur des Rußes erreicht, heizt sich Filter durch frei werdende Wärme weiter auf
- Spitzentemperaturen (1000°C und höher) können zur Zerstörung des Filters führen
- Je höher Beladung desto höher Gefahr der unzulässigen T-überhöhung
- Kritische Beladung 5-10 g Ruß pro Liter Filtervolumen
- Wegen Beladung mit Aschen und anderen Rückständen über Betriebszeit, ist eine mechanische Reinigung nach ca. 120-180 Tkm nötig

SCR-Katalysator

Chemische Reaktionen im SCR-System

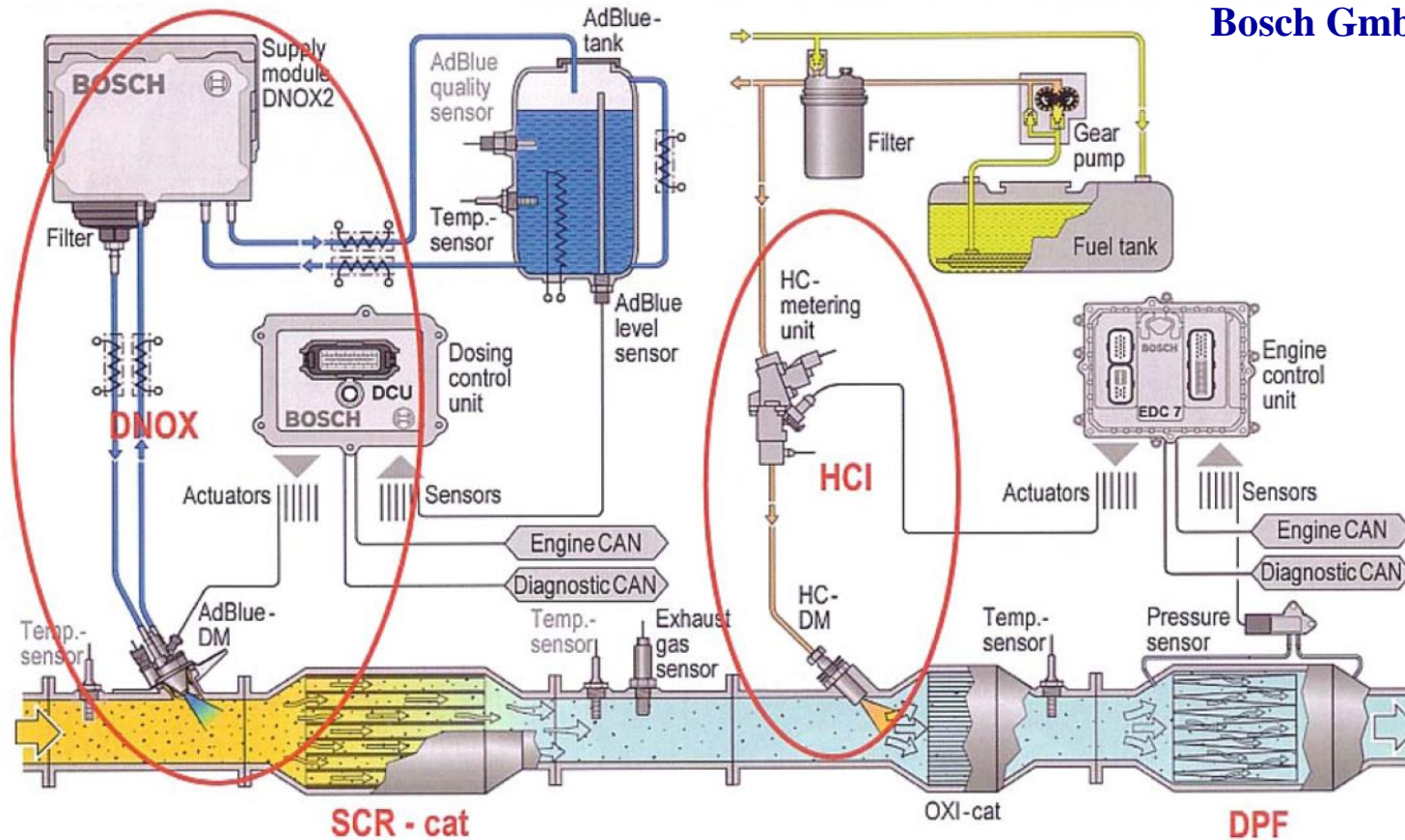


Konvertierungsraten der betriebswarmen Katalysatoren

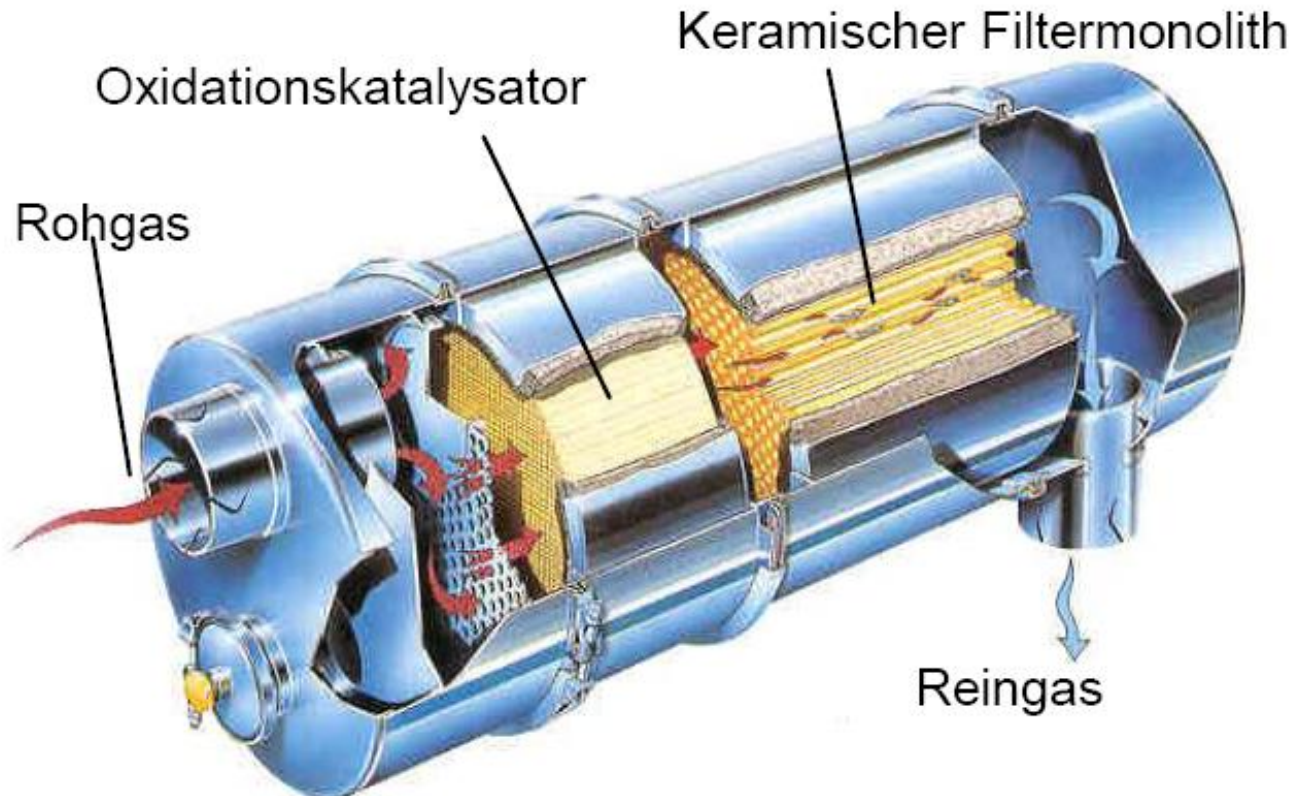
Kat-Typ	Konvertierung/ Rückhaltegrad	Motor
3-Wege-Kat	>99%	Otto, $\lambda=1$
NO _x -Speicherkat	ca. 50% (gemittelt)	Otto, BDE Diesel, $\lambda=1,5-1,6$
SCR-Kat	70-85% (instationär) 95% (quasi-stationär)	Diesel
Oxidationskat	>95-99%	Diesel
Partikelfilter	>90% (10-1000 nm)	Diesel

Möglicher Aufbau einer Diesellabgasnachbehandlung

Quelle: Robert
Bosch GmbH



Bsp. Aufbau CRT-System



Übungsaufgabe Abgasnachbehandlung – Exothermie Katalysator

Gegeben ist ein Katalysator eines Dieselmotors. Vereinfacht soll das Abgas Kohlenstoffmonoxid, Propen (als unverbrannten Kohlenwasserstoff), Sauerstoff und Stickstoff enthalten. Für die stattfindenden Reaktionen ist ausreichend Sauerstoff im Abgas vorhanden. Gesucht ist die Austrittstemperatur des Katalysators (Wärmeverluste sollen vernachlässigt werden).

geg.: $\dot{m}_{Abgas} = 150 \frac{kg}{h}$

ges.: $T_{nachKat}$

$T_{vorKat} = 400^\circ C$

$c_{CO} = 3000 ppm$

$c_{C_3H_6} = 1000 ppm$

$c_{p,Abgas} = 1004 \frac{J}{kgK}$

$Umsatz_{CO} = 98\%$

$Umsatz_{C_3H_6} = 95\%$

$M_{N_2} = 28 \frac{g}{mol}$

Standardbildungsenthalpien ¹	
Spezies	ΔH_f^0
	$\left[\frac{kJ}{mol} \right]$
CO	-110.6
CO ₂	-393.8
C ₃ H ₆	20.4
H ₂ O	-242.0
O ₂	0.0