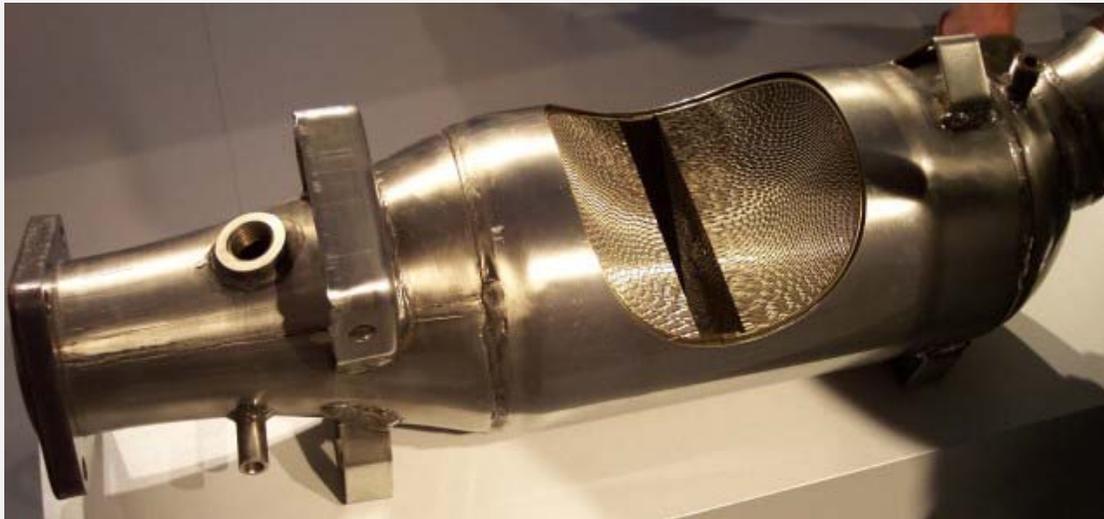


# KFZ-Katalysator und Lambda-Sonde



Katharina Albers  
Patrick Puklowski

# Inhalt

## 1. Abgase

- Historisches
- Warum ist Abgasreinigung nötig?
- Vergleich Diesel / Benzin
- Unterschied Benzin /Dieselmotor
- ungefiltertes Abgas

## 2. Schadstoffe im Abgas

- Rußpartikel
- Kohlenmonoxid
- Stickoxide
- Schwefeldioxid

## 3. Katalysator

- Was macht ein Katalysator?
- Aufbau eines Katalysators
- 3-Wege-Katalysator
- Diesel-Oxidations-Katalysator
- NO<sub>x</sub> Speicherkatalysator
- SCR (Selektive katalytische Reduktion)

## 4. Lambdasonde

- Allgemeine Infos zur Lambdasonde
- Funktion der Nernst Sonde
- Funktion der Widerstands Sonde
- Verwendung der Lambdasonde im Motor
- Aufbau der Sonde

# Historisches

**1876:** Patentierung des Ottomotors durch Nikolaus August Otto

**1892 - 1897:** Erfindung des Dieselmotors durch Rudolf Diesel

**1960'er:** Beginn der Forschung an Fahrzeugkatalysatoren

**ab 1974** entwickelte General Motors Autokatalysatoren für Benzinmotoren

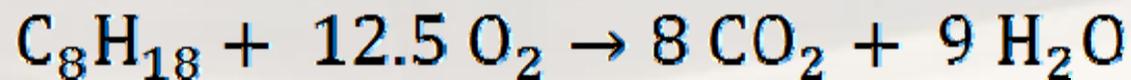
**1975:** erster ungeregelter Katalysator

**1976:** Erfindung der Lambdasonde durch BOSCH

**1989:** Katalysator wurde gesetzmäßig in Neufahrzeuge eingebaut

# Warum ist Abgasreinigung nötig?

- Verbrennung von Kraftstoffen im Automotor
- Kraftstoffe bestehen hauptsächlich aus Kohlenwasserstoffen
- bei der Verbrennung von Kraftstoff mit Hilfe von Luftsauerstoff entstehen CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O
- **idealisierte Verbrennung:**



# Warum ist Abgasreinigung nötig?

- Verbrennung läuft nicht vollständig ab
- es entstehen noch weitere Verbrennungsprodukte  
→ Abgase

# Vergleich Diesel / Benzin

|                                  | <u>Benzin</u>   | <u>Diesel</u>   |
|----------------------------------|---|---|
| <b>C-Kettenlänge</b>             | 4 - 10  | 9 - 22  |
| <b>Dichte [kg/m<sup>3</sup>]</b> | 720 – 775   | 820 – 845   |
| <b>Siedepunkt [°C]</b>           | 35 – 210  | 200 – 360   |
| <b>Zündtemperatur [°C]</b>       | 300   | 220   |
| <b>Motorzündung</b>              | Zündkerzen  | Selbstzünder  |
| <b>Verbrennungsprodukte</b>      | CO, HC und NO, NO <sub>2</sub><br>(zusammengefasst zu <u>NO<sub>x</sub></u> ) | CO, HC und NO, NO <sub>2</sub><br>(zusammengefasst zu <u>NO<sub>x</sub></u> ),<br>SO <sub>2</sub> und Rußpartikel |
| <b>Oktanzahl</b>                 | 91, 95, 98, 100   | /   |
| <b>Cetanzahl</b>                 | /   | 51, 55, 60  |

# Unterschied Benzin- / Dieselmotor

## Benzinmotor

- Benzin-Luft-Gemisch gelangt in den Brennraum des Motors
- mit Hilfe einer Zündkerze wird ein kurzer elektrischer Zündfunke erzeugt
- das Gemisch wird zeitlich genau zur Explosion gebracht

→ **Benzin: CO, HC und NO, NO<sub>x</sub>**

## Dieselmotor

- kein zündfähiges Luft-Kraftstoff-Gemisch, sondern ausschließlich Luft
- Luft wird zunächst im Zylinder hoch verdichtet,  
→ Erwärmung auf etwa 700 bis 900 °C
- Einspritzung und Feinstverteilung des Kraftstoffes in der heißen Luft im Brennraum
- Kraftstoff wird von der Oberfläche beginnend verdampft
- das Dampf-Luft-Gemisch zündet

→ **Diesel: CO, HC und NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> und Rußpartikel**

# ungefiltertes Abgas

| <b>Verbrennungs-<br/>produkt</b> | <b>Vol. %</b> | <b>Volumen [L]<br/>auf 100 km</b> |
|----------------------------------|---------------|-----------------------------------|
| CO <sub>2</sub>                  | 87.6          | 7422.3                            |
| CO                               | 10.3          | 872.7                             |
| NO <sub>x</sub>                  | 0.6           | 50.8                              |
| SO <sub>2</sub>                  | 0.06          | 5.1                               |
| C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>    | 1.07          | 90.7                              |
| <b>Summe</b>                     |               | <b>8441.6</b>                     |

# Schadstoffe im Abgas – Rußpartikel

- mikroskopischen Kohlenstoffkügelchen
- die aus Kraft- und Schmierstoff stammenden KW's lagern sich an und verdichten sich
- ein Dieselmotor arbeitet prinzipiell immer mit der gleichen Luftmenge
  - gewünschte Leistung wird durch die Menge des eingespritzten Kraftstoffs erzielt
  - z.B. beim Beschleunigen kann das Gemisch in einigen Brennraumbereichen zu fett sein (Sauerstoffmangel)
  - Verbrennung bleibt dann unvollständig
  - Bildung von Partikeln
- **Ottomotor:** Rußpartikel etwa um den Faktor 20 bis 200 niedriger
- können über die Atemwege in die Lunge gelangen
  - kleiner als 0,0025 mm: Gesundheitsgefährdung, besonders für ältere und angeschlagene Menschen

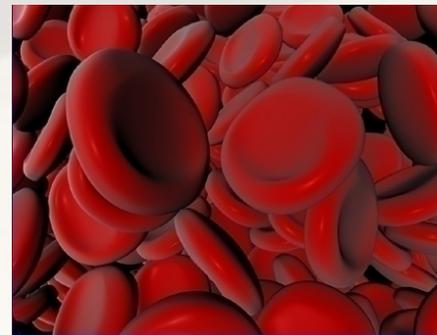


# Schadstoffe im Abgas - Kohlenmonoxid

- farb- und geruchloses, hochgiftiges Gas
- unvollständige Verbrennung (Start, Leerlauf)



- wirkt in kleinsten Mengen tödlich  
→ behindert als Atemgift den  
Sauerstofftransport im Blut durch die roten  
Blutkörperchen

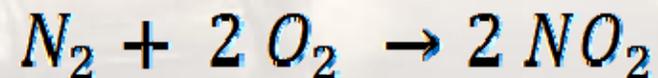


# Schadstoffe im Abgas -Stickoxide

- Stickoxide:  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $N_2O_3$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O_4$ ,  $N_2O_5$
- starke Atemgifte

- **Saurer Regen:**

→ Oxidation von Stickstoff aus der Luft:

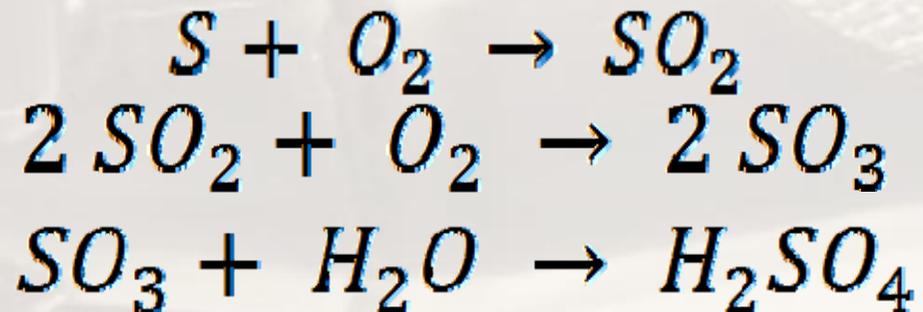


- beteiligt an der Bildung von Ozon in der Atmosphäre



# Schadstoffe im Abgas - Schwefeldioxid

- Schwefelreste des Erdöls im Benzin und Diesel
- Verbrennung im Motor zu Schwefeldioxid
- lungenreizendes Gas
- Hauptverursacher für Sauren Regen und Waldsterben
- Oxidation von Schwefel mit Sauerstoff:



→ zerfrisst Bauwerke aus Naturstein



# Was macht ein Katalysator?

- Minderung von Schadstoffen im Abgasstrom
- keine Anlagerung von Schadstoffen an der Oberfläche
- im Abgas vorhandene Stoffe werden in umweltverträgliche Stoffe umgewandelt



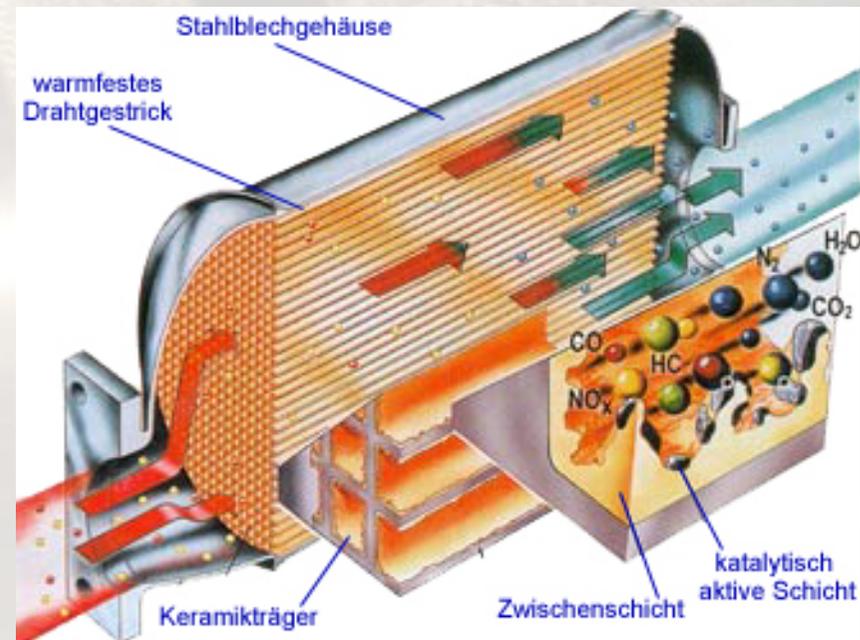
# Aufbau eines Katalysators

## 1. Träger:

- Monolithe (AlMg-Silikat = Keramik) oder Metallträger
- von tausenden Kanälen durchzogen, um die Oberfläche zu vergrößern
- geringer Strömungswiderstand durch dünne Wände

## 2. Zwischenschicht (Washcoat)

- Schicht aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- Vergrößerung der Oberfläche um das 7000-fache
- Erhöhung der Sauerstoffspeicherfähigkeit



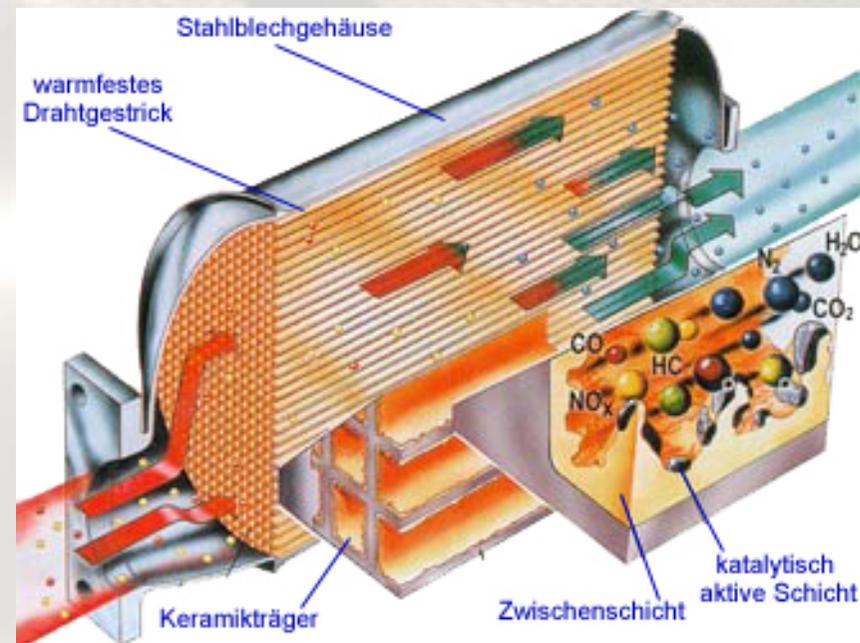
# Aufbau eines Katalysators

## 3. Katalytisch aktive Schicht

- Edelmetalle rufen Reaktion hervor:  
Platin, Rhodium, Palladium
- Platin: begünstigt  
Oxidationsvorgang
- Rhodium: begünstigt  
Reduktionsvorgang

## 4. Gehäuse mit Dämpfung

- keramische Träger sehr spröde
- andere Wärmedehnung als das  
Gehäuse
- Dämpfungsschicht, Drahtstrick,  
Keramikfasermatte

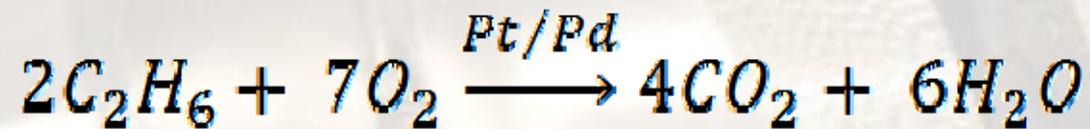
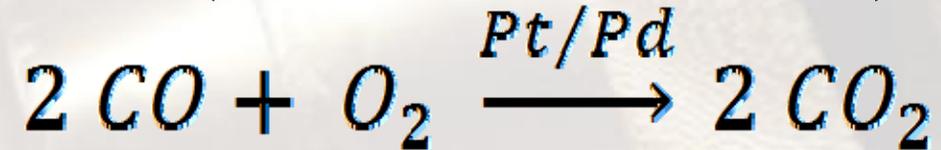


# 3-Wege-Katalysator

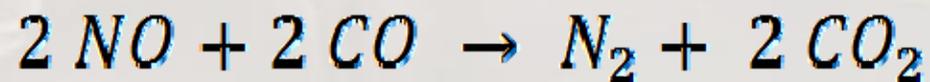
- **reduziert folgende Schadstoffe um bis zu 90%:**
  - Kohlenmonoxid (CO)
  - Stickoxide ( $\text{NO}_x$ )
  - unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC)
- nur bei Fahrzeugen mit Ottomotor und Lambdaregelung
- Sauerstoffüberschuss im Dieselmotor verhindert die Reduktion des  $\text{NO}_x$
- **geregelter Katalysator:** Steuerung durch Lambdasonde

# 3-Wege-Katalysator

- **Oxidation (Platin / Palladium):**



- **Reduktion (Rhodium):**



# Diesel-Oxidations-Katalysator

- hohe Sauerstoffkonzentration im Abgas  
→ Erhöhung des Motorwirkungsgrades
- Reduktion von  $\text{NO}_x$  nicht möglich
- Oxidation von  $\text{H}_m\text{C}_n$ - und CO-Emission
- Reaktionen gleich denen im 3-Wege-Katalysator
- Washcoat enthält nur Platin und/oder Palladium
- $\text{NO}_x$ -Minimierung durch Abgasrückführung  
→ **Problem:** Anstieg der Ruß-Emission und  
Verlust der Motorleistung

# NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator (Diesel)

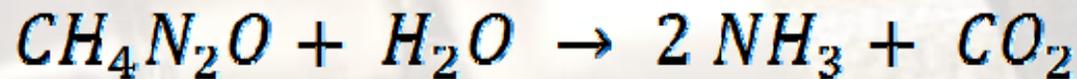
- auf geeigneten Trägern werden ein Edelmetallkatalysator (Platin) und eine NO<sub>x</sub>-Speicherkomponente (Barium) aufgebracht
- Speicherung nur zwischen 250°C und 500°C möglich
- **erhöhte Sauerstoffkonzentration**
  - Stickoxide werden durch Platin zu NO<sub>2</sub> oxidiert
  - Speichermaterial (z.B. BaCO<sub>3</sub>) auf dem Träger adsorbiert NO<sub>2</sub>  
$$2 \text{BaCO}_3 + 4\text{NO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{Ba(NO}_3)_2 + 2 \text{CO}_2$$
- parallel dazu Oxidation von CO und H<sub>m</sub>C<sub>n</sub> zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O

# NO<sub>x</sub> - Speicherkatalysator (Diesel) - Funktion

- **Sättigung des Speichermaterials:**
  - 2-10 Sekunden lang wird die O<sub>2</sub>-Zufuhr verringert
  - eingelagertes NO<sub>2</sub> wird wieder abgegeben
  - im Kraftstoff vorhandene Reduktionsmittel (z. B. HC, CO) wandeln NO<sub>2</sub> zu N<sub>2</sub> um
$$2 \text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + 8 \text{CO} \rightarrow 2\text{BaCO}_3 + \text{O}_2 + 6 \text{CO}_2 + \text{N}_2$$
  - Regeneration, neue NO<sub>x</sub>-Einlagerung möglich
- **Nachteil:**
  - ungewollte Einlagerung von Schwefel
  - Vergiftung des Speichermaterials durch Sulfatbildung
  - Erhöhung der Temperatur durch kurzzeitige Erhöhung der Einspritzmenge

# SCR (Selektive katalytische Reduktion)

- kontinuierliches Einspritzen einer wässrigen Harnstofflösung (32,5%-ig, „AdBlue“)
- **Hydrolyse der Harnstofflösung:**



- **Reduktion von  $NO_x$  im Abgas:**



# Allgemeine Informationen zur Lambda Sonde

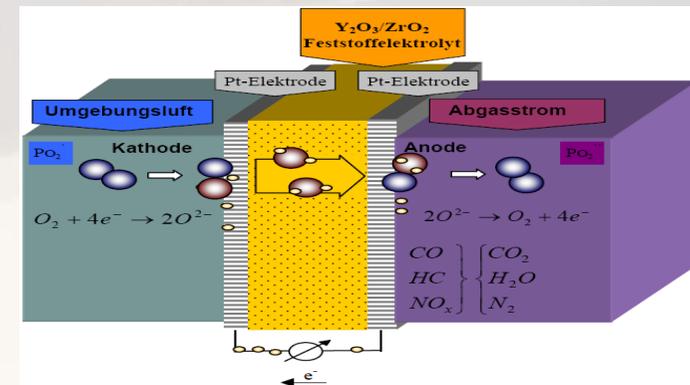
- Stellt das Luft / Treibstoffgemisch bei der Verbrennung ein
- Messprinzip basiert auf dem Restsauerstoffgehalt im Abgas
- Hauptsensor zur katalytischen Abgasreinigung
- 1976 erstmals von der Firma BOSCH vorgestellt
  
- **Zwei Messprinzipien:**
  - Spannung eines Festkörperelektrolyten (Nernstsonde)
  - Widerstandsänderung einer Keramik (Widerstandssonde)
  
- **Verwendung:**
  - Hauptsächlich in Ottomotoren verwendet, vereinzelt auch zur Regelung von Brennkesseln und Dieselmotoren

# Funktion der Nernstsonde

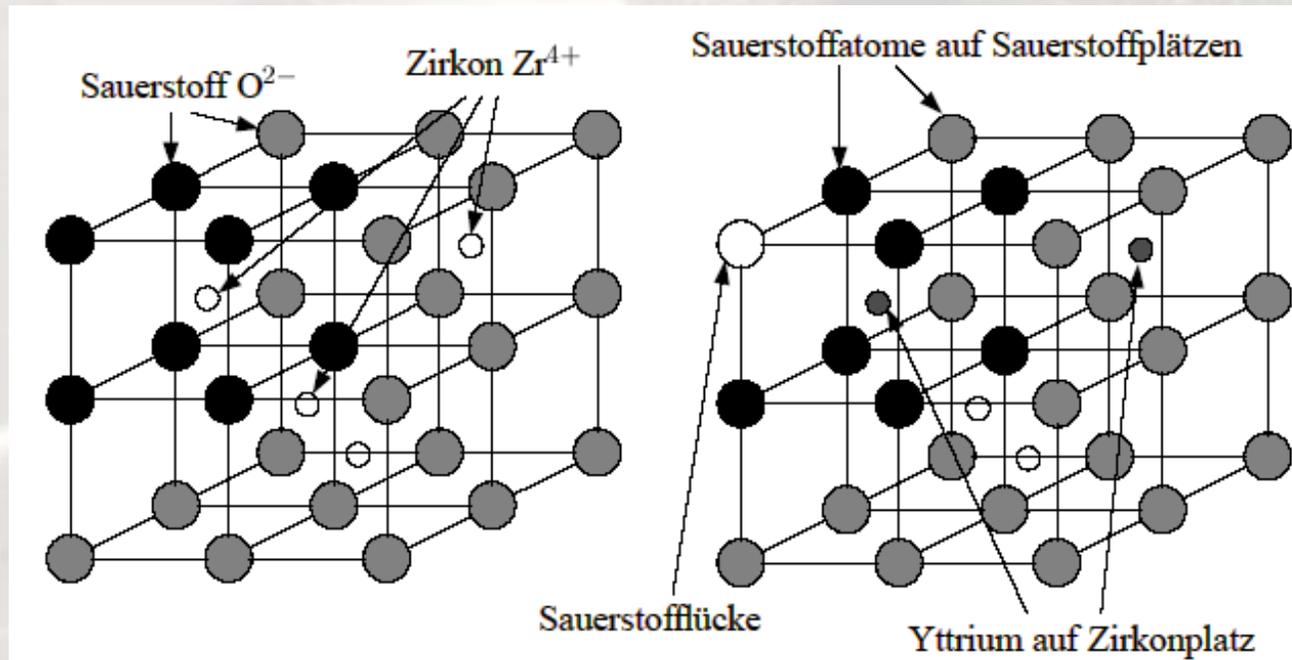
- Keramisches Sensorelement im Abgasstrom, an einem Teil liegt eine Sauerstoffreferenz an. Dies geschieht entweder über die direkte Umgebungsluft, eine Öffnung an der Sonde oder durch eine Zuleitung. Letzteres erschwert die Referenzluft Vergiftung mit Kraftstoff oder Öl
- Heute verwendetes Verfahren ist die „gepumpte Referenz“

# Funktion der gepumpten Referenz

- Keine Umgebungsluft mehr relevant, da die Sauerstoffreferenz durch einen aufgeprägten Sauerstoff Ionenstrom aus dem Abgas hergestellt wird.
- Funktion:
  - Bei über 300°C wird eine Yttrium dotierte Zirkoniumdioxid - Keramik für  $O^{2-}$ -Ionen leitend. (Ionendiffusion zum Abgas)
  - Die erforderlichen Elektronen werden durch Elektroden geliefert.
  - Die Spannung lässt sich von, außen und innen angebrachten, Pt-Elektroden abnehmen (Sondenspannung)
- Die Sondenspannung wird an das Motorsteuergerät weitergeben



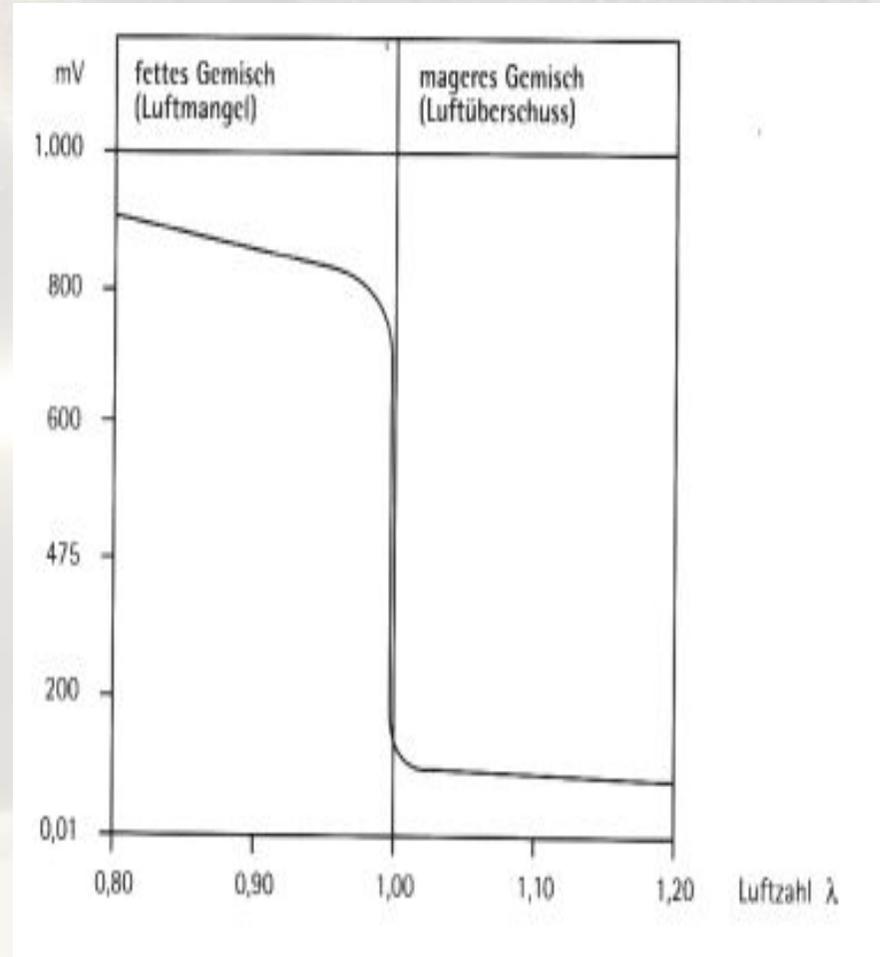
# Aufbau der Sonden Keramik



# Funktion der Nernstsonde

- $\lambda > 1$  (mageres Gemisch, zuviel Luft) 0-150mV
- $\lambda < 1$  (fettes Gemisch, zuviel Kraftstoff) 800-1000 mV
- $\lambda = 1$  ( $\lambda$  – Fenster) ändert sich die Spannung sprunghaft in Abhängigkeit vom Luft-Kraftstoff-Verhältniss
- Die Spannung wird durch die Nernst Gleichung beschrieben

$$U_d = \frac{RT}{4F} \ln \frac{p_{O_2}(\text{Luft})}{p_{O_2}(\text{Abgas})}$$



# Funktion der Widerstandssonde

- Sie wird weniger häufig eingesetzt
- Besteht aus einer halbleitenden TiO<sub>2</sub>- Keramik
- Messprinzip:
  - Sauerstoff besetzt die Fehlstellen im Material und verringert somit die Freien Ladungsträger. Folglich hat das Material bei einer hohen O<sub>2</sub>-Konzentration einen hohen Widerstand.
  - Die Leitfähigkeit- $\sigma$ - lässt sich durch eine Arrhenius-Gleichung mit einer Aktivierungsenergie  $E_A$  beschrieben

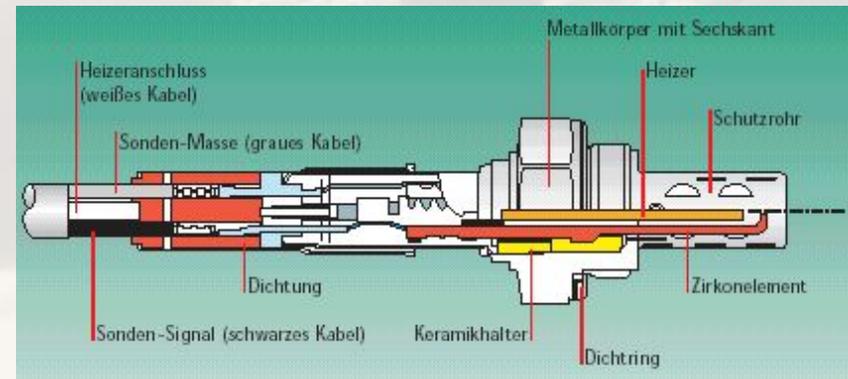
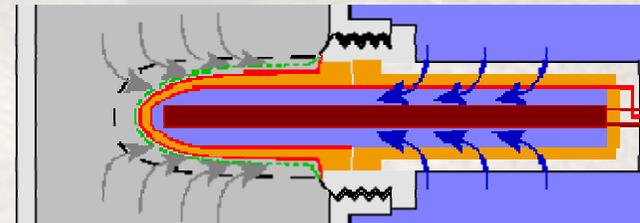
$$\sigma = A \cdot e^{-\frac{E_A}{k \cdot T}} \cdot p(O)^{-1/4}$$

# Verwendung der Lambda-Sonde im Motor

- Bei Ottomotoren in der Regel kurz hinter den Krümmern oder dem Sammelrohr eingeschraubt
- Bei hohen gesetzlichen Anforderungen kommen mehrere Sonde zum Einsatz
- Bei V-Motoren wird in der Regel eine Sonde pro Bank eingebaut bis hin zu einer Sonde pro Zylinder (selektive Regelung)
- Bei Turbomotoren wird die Sonde hinter dem Turbolader eingebaut

# Aufbau der Sonde

- Erste Sonden waren als Fingersonden gebaut. Sie waren wie Hütchen gebaut mit dem Abgas außen und der Referenz Luft innen.
- Heute werden die Sensoren in Planartechnik gebaut wobei die Sondenheizung gleich mit eingebaut ist. Bei dieser Bauart ist das keramische Element von einem Schutzrohr umgeben. Es hilft den Sensor auf  $T < 300^{\circ}\text{C}$  zu halten und beugt mech. Schäden vor. Löcher im Schutzrohr sorgen für den Gaszutritt



# Sondenheizung

- Da die Sonde bei einem Kaltstart der Motors  $T < 300^{\circ}\text{C}$  nicht richtig arbeiten kann wird sie geheizt. So ist gewährleistet das der Motor auch in der Warmlaufphase im emmisionsoptimierten Bereich betrieben wird. Die Optimale Arbeitstemperatur liegt bei  $550^{\circ}\text{C} - 700^{\circ}\text{C}$

# Monitorsonde

- Die Monitorsonde ist eine weitere Lambda-Sonde und wird hinter den Katalysator verbaut. Sie gibt eine Fehlermeldung wenn der Katalysator O<sub>2</sub>-Speicherfähigkeit verliert

# Quellen

- <http://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/abgas/katalysator.htm>
- <http://www.seilnacht.com/Lexikon/Auto.htm>
- <http://www.motorradthunder.de/lexikon/images/katalysator.jpg>
- <http://www.oppisworld.de/zeit/erfinder/eauto.html>
- [http://de.wikipedia.org/wiki/Automobil#Im\\_19.\\_Jahrhundert](http://de.wikipedia.org/wiki/Automobil#Im_19._Jahrhundert)
- <http://www.amc-katalysatoren.de/index.php?kat=faq>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Fahrzeugkatalysator>
- <http://www.motorlexikon.de/?I=2530&R=K>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Lambdasonde>
- <http://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/abgas/lambda/lambda1.htm>
- [http://www.vias.org/mikroelektronik/sensor\\_lamdasonde.html](http://www.vias.org/mikroelektronik/sensor_lamdasonde.html)
- <http://www.ipe.uni-stuttgart.de/content/web6/FA%202006%20Selected%20Fotos/presentation.pdf>