



NO_x Abgasnachbehandlung eines Diesel Motors mit Selective Catalytic Reduction (SCR)

Vergleich von AdBlue Einspritzung
und gasförmiger NH₃ Dosierung

Betreuer: Dipl. Ing. Stephan Stadlbauer



Übersicht

- Ziele der Arbeit
- Einleitung/Problemstellung
- Euro VI Norm
- Versuchsaufbau
- Auswertung
- Vergleich
- Fragen?



Ziele der Arbeit/ Messungen

Ziele der Arbeit

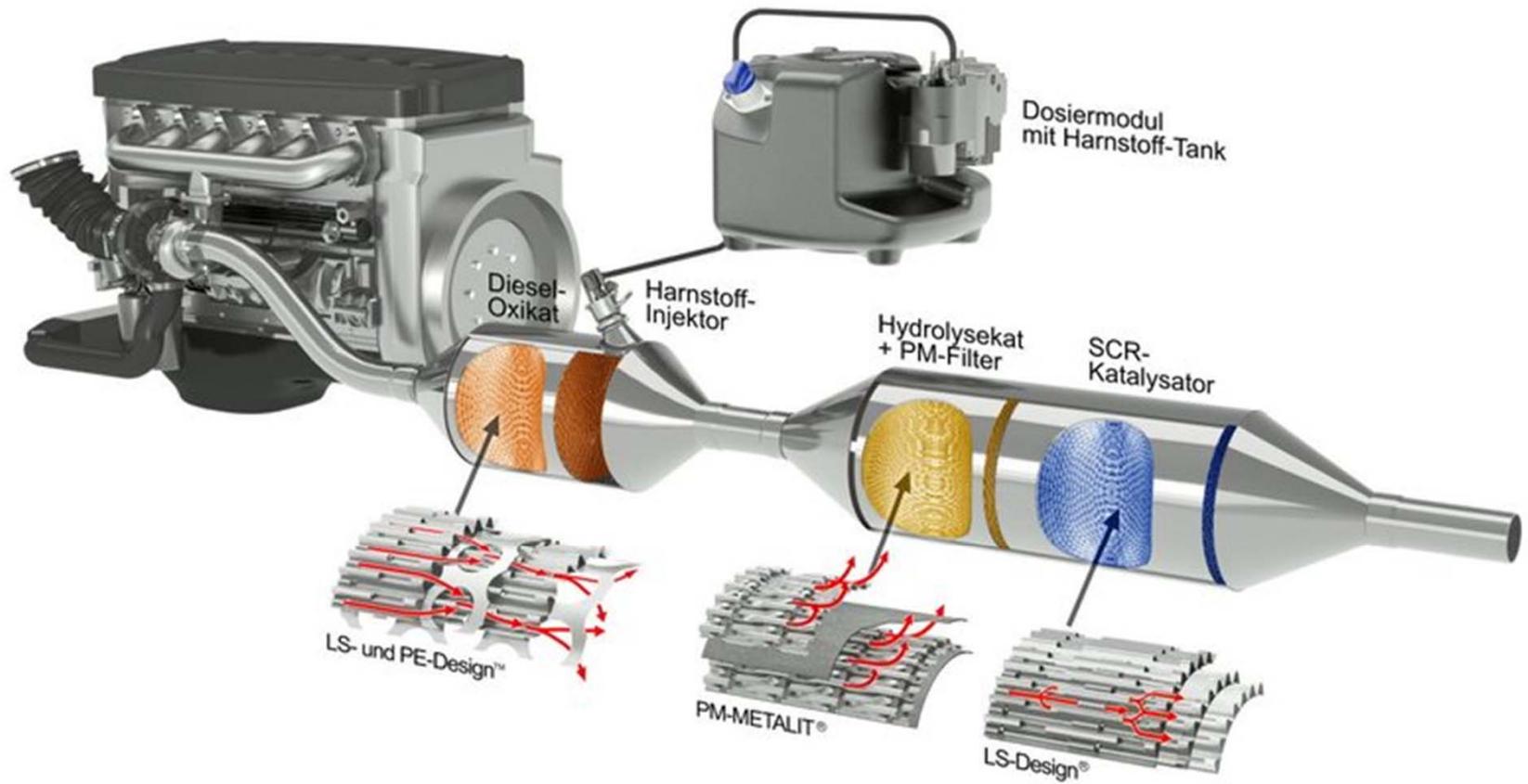
- Untersuchung der Vorteile/Nachteile von AdBlue Einspritzung bzw. gasförmiger Dosierung von NH_3
- Positionierung der Sensoren im Abgasstrom zur Erfassung der Ungleichverteilungen von NH_3 und NO_x
- Versuche mit beiden Methoden am Prüfstand
- Auswertung und Vergleich der Dosiermethoden

Einleitung

- Rasante industrielle Entwicklung
- Direkt proportionaler Anstieg an Abgasemissionen
 - Kohlendioxid(CO₂) und Kohlenmonoxid(CO)
 - Schwefeloxiden(SO_x)
 - Stickoxiden(NO_x)
 - unverbrannten Kohlenwasserstoffen(HC)
 - Feinstaub (PM)
- Auswirkungen auf Umwelt
 - globale Erwärmung
 - SMOG
 - den Treibhauseffekt
 - sauren Regen
 - erhöhte Konzentrationen von erdoberflächennahem Ozon.

- 
- Steigendes Umwelt- und Energiebewusstsein
 - Diesel bessere Effizienz aber höhere NO, NO₂ sowie Feinstaub Emissionen
 - Gesetzlich immer strengere Richtlinien (Euro Normen)
 - Abgaswerte rein durch innermot. Maßnahmen wie
 - Verbrennungs-, Einspritzsregelung
 - Turboaufladung
 - höhere Einspritzdrücke
 - Abgasrückführung
 - nicht mehr erreichbar → Nachbehandlung erforderlich
 1. Diesel Oxidations- Katalysator (DOC)
 2. Dieselpartikelfilter (DPF)
 3. Selektive Katalytische Reduktion (SCR)
 4. Lean NOx Traps

- Emitec System



Abgasnachbehandlungsverfahren

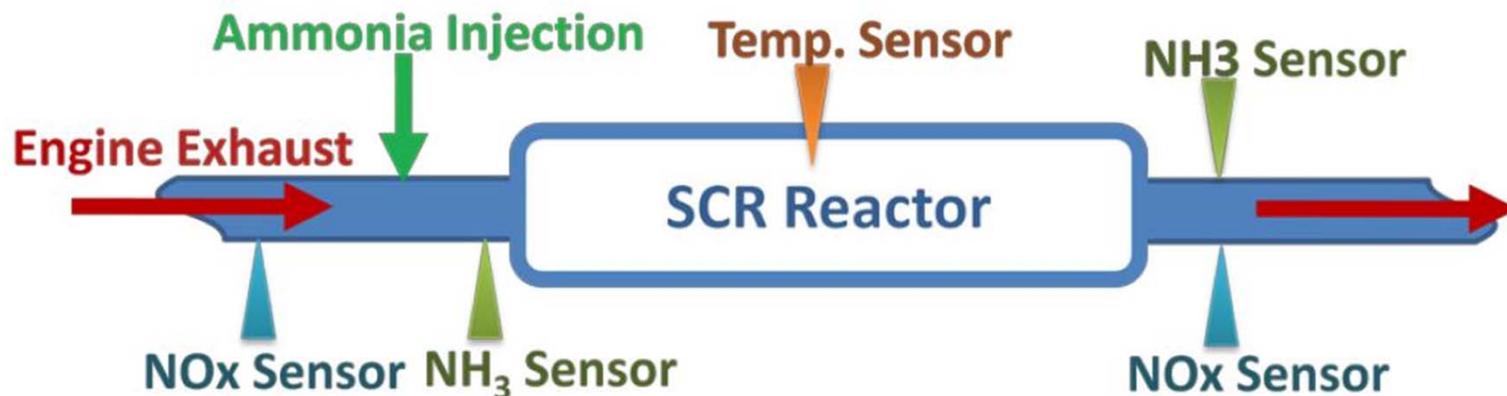
- DOC

- Reduktion von CO und HC durch Oxidation mit Restsauerstoff
- Ungiftige Produkte: CO₂, H₂O, N₂
- Betriebstemperatur von 200- 500°C → Problem bei Kaltstart

- DPF

- Herausfiltern der Rußpartikel bei hoher Motorlast oder großen Abgasrückführraten
- Filterung durch poröser Membran (~10 um Porengröße)
- 90% weniger Partikel, jedoch nur 50% weniger der sehr feinen, lungengängigen, krebserregenden Teilchen
- Nachteile:
 - Regeneration alle rund 1000 km erforderlich
 - Rund 9% höherer Kraftstoffverbrauch durch Rückstau

- SCR
 - NO_x Reduktion
 - Zusätzlicher Reaktionsagent NH₃ nötig
 - Aufbau:
 - Katalysator/ Reaktor
 - NO_x, NH₃ Sensoren
 - Einspritzregelung mit FFC, (FBC)
 - NH₃ Dosierung
 - Gasförmig
 - Flüssig über Einspritzung von AdBlue



- 
- **Gasförmige Dosierung:**
 - Gasförmiges Ammoniak aus Druckbehälter
 - Burkert Massenstromregelung für NH₃
 - Einlassdüse/ Lanze
 - Leitungsdruck rund 1,6 bar über Luftdruck
 - Verwirblungsstrecke für möglichst gleichmäßige Verteilung im Abgas (rund 30cm)
 - Nachteile:
 - problematische Lagerung in Druckflaschen (Sicherheitsrisiken)
 - Umständlicher bei Nachfüllungsvorgang
 - NH₃ bei Körperkontakt stark reizend
 - Dosiermengen unter 8mg/sec nicht möglich mit dem verwendeten Massenstromregler



- Flüssigdosierung:

- Wässrige Harnstofflösung aus Speichertank
- Druckpumpe für Einspritzung mit rund sieben Bar
- PWM gesteuerte Dosierung über Düse ins Abgas
- Wasser verdunstet, Harnstoffkristalle fein verteilt
- Zersetzung zu NH₃ und Isozyansäure(HNCO)

- Endotherme Hauptreaktion:



- HNCO reagiert weiter durch exotherme Hydrolyse

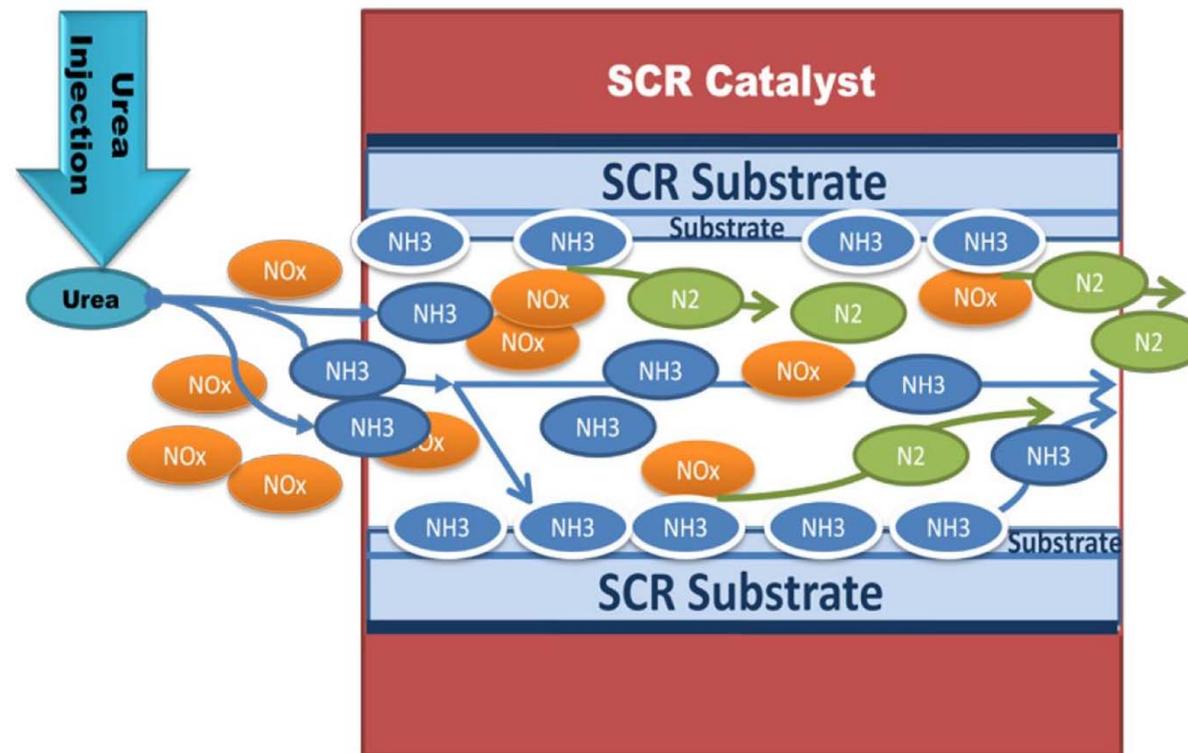


- Vorteil / Nachteile:

- + einfache Handhabung, Speicherung, ungiftige Lösung
- - Pumpe, Einspritzdüse erforderlich
- - Thermische Zersetzung über 60, Auskristallisierung unter -11°C

- **Katalysator/Reaktor**

- Besteht aus Trägermaterial mit aufgebrachtem Substrat
- Substrat mit großer Oberfläche und eingelagerten Edelmetallen als chemische Katalysatoren
- Ammoniak wird im Substrat adsorbiert und gespeichert, kann so mit NO_x reagieren





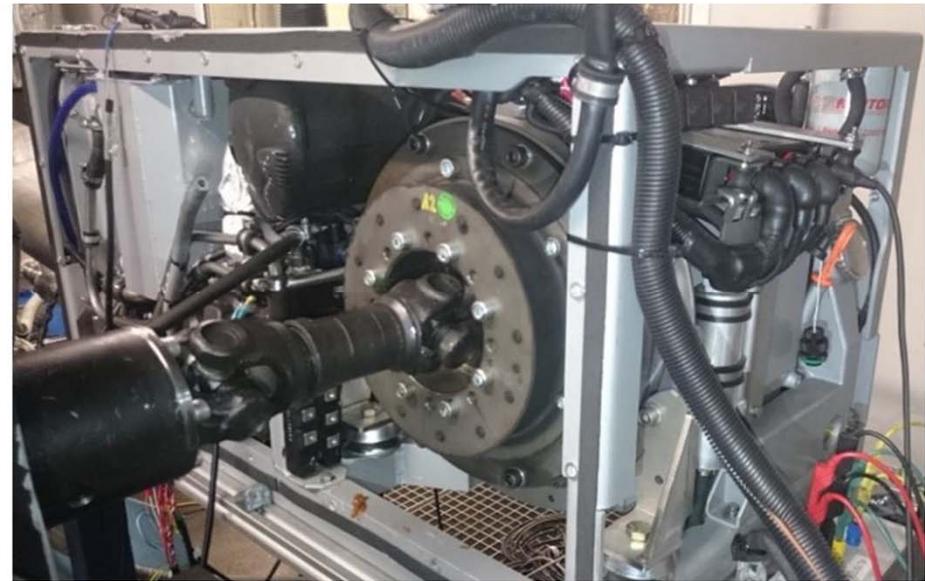
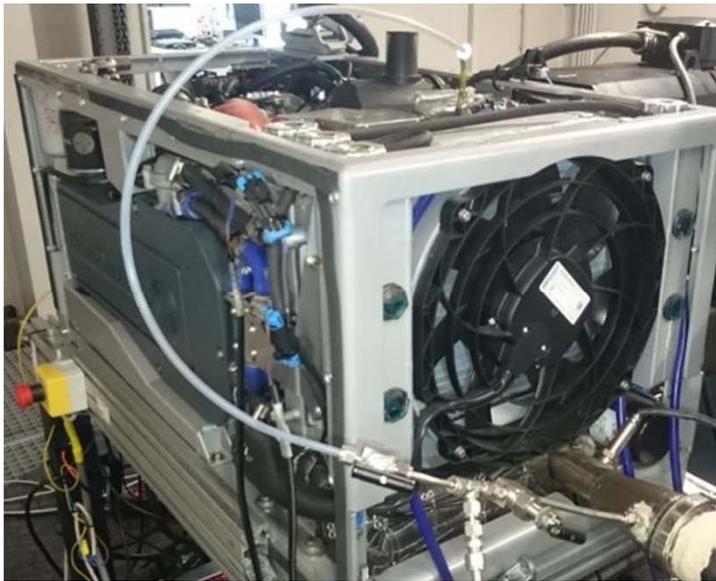
- Reduktion durch drei Hauptreaktionen



- Reaktion 2. trotz geringerer Reaktionsgeschwindigkeit Hauptreaktion
- Grund: NO_2 -Anteil von NO_x im Rohabgas nur rund 10%
- Jedoch Verschiebung des Reaktionsschwerpunktes bei Vorhandenseins eines DOC oder DPF vor der SCR- Einheit.
- \rightarrow NO_2 Anteil höher und Reaktion 1. wichtiger
- Reaktion 3. wird oft vernachlässigt

Versuchsaufbau

- Motoreinheit
 - 2 liter 2 Zylinder Range extender von Steyr Motors
 - Maße Rahmen: 90 x 50 x 50 cm
 - SCR Katalysator aber kein DOC
 - Abgasnachbehandlung mit Flüssigdosierung
 - Turbolader
 - Ladeluftkühlung
 - Abtrieb zu Dyno mit Schwungscheibe



• SCR Katalysator

- Kupfer- Zeolite Katalysator mit 0,78 Liter Volumen
- Abmessungen: 33 x 17 x 8cm
- Thermische Isolierung mit 10mm Kevlarmatte
- Mischstrecke rund 30 cm



- 
- Flüssig- Dosierung (AdBlue)
 - Speicherbehälter
 - Druckpumpe mit 8bar Betriebsdruck
 - AdBlue Qualitätssensor
 - Einspritzdüse

 - Ammoniak Direktzugabe
 - Speicherbehälter (Hochdruckflasche)
 - Burkert Massenstromregler
 - Leitung zur Dosieröffnung am Katalysator



Adblue Einspritzdüse



Burkert Massenstromregler

- 
- **Horiba Messstation**
 - Zur Messung der Volumen- Konzentration von NO, NO₂, CO₂, O_s und NO_x
 - Besteht aus:
 - Exhaust Gas Analyzer in modularem Aufbau
 - Gas Zu- und Ableitungen
 - Main Controll Unit
 - Messung über Abzweigung geringer Abgasmengen
 - Totzeiten durch Leitungstransport (~6s)
 - Messprinzip NO_x: Chemolumineszenz (Reaktion mit Ozon aus internem Ozongenerator)
 - Detektion über Si- Fotodiode



Auswertung, Vergleich

- Bestimmung der Totzeiten
 - Prinzipiell zwei Quellen:
 1. Messstation und Messleitungen zur Station
 2. Ad- bzw Desorption des SCR Katalysators



I. Totzeit von rund 7s nach Betriebspunkt

- Reaktionszeit der Messstation ($\sim 0,9s$)
- Zeit bis zu messendes Gas in Messstation angekommen ist ($\sim 6s$)
- Zeit von Volumenstrom des Abgases abhängig
→ von Drehzahl- und Einspritzmenge
- schnellere Reaktionszeit durch größeren Abgasdruck bei mehr Volumenstrom des Abgases
- Abhängigkeit der Totzeit von Volumenstrom in unserem Fall auf Grund langer Leitungen vernachlässigbar
- Messung ohne Dosing über Sprung im gewünschten Moment und der Reaktion in der NO_x- Konzentration

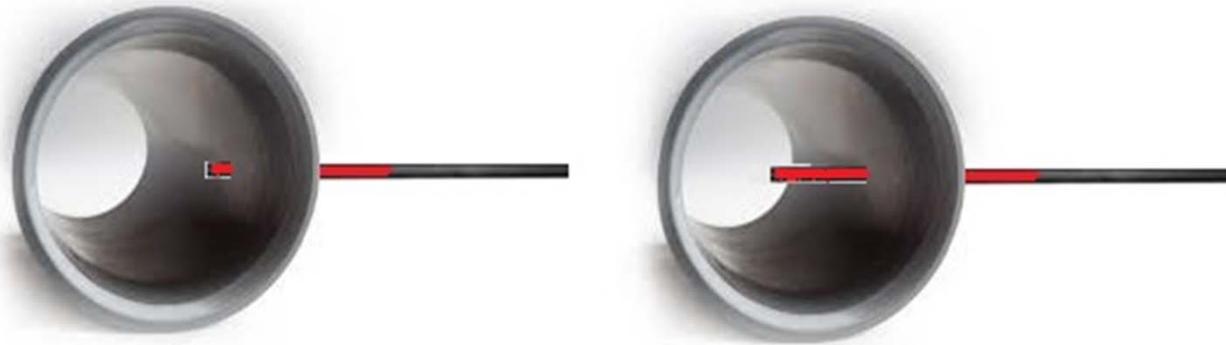


2. Totzeiten des Katalysators stark von Betriebspunkt abhängig

- Adsorption bei höheren Betriebstemperaturen und Volumenstrom schneller
 - ~2,8s bei 2400 U/min und 29,8mg/str Einspritzung
 - ~11,9s bei 2400 U/min und 22mg/str Einspritzung
 - ~82,6s bei 1800 U/min und 11,8mg/str Einspritzung
- Desorption bei höheren Betriebstemperaturen und Volumenstrom wesentlich schneller
 - ~9,8s bei 2400 U/min und 29,8mg/str Einspritzung
 - ~23,1s bei 2400 U/min und 22mg/str Einspritzung
 - ~9 min bei 1800 U/min und 11,8mg/str Einspritzung

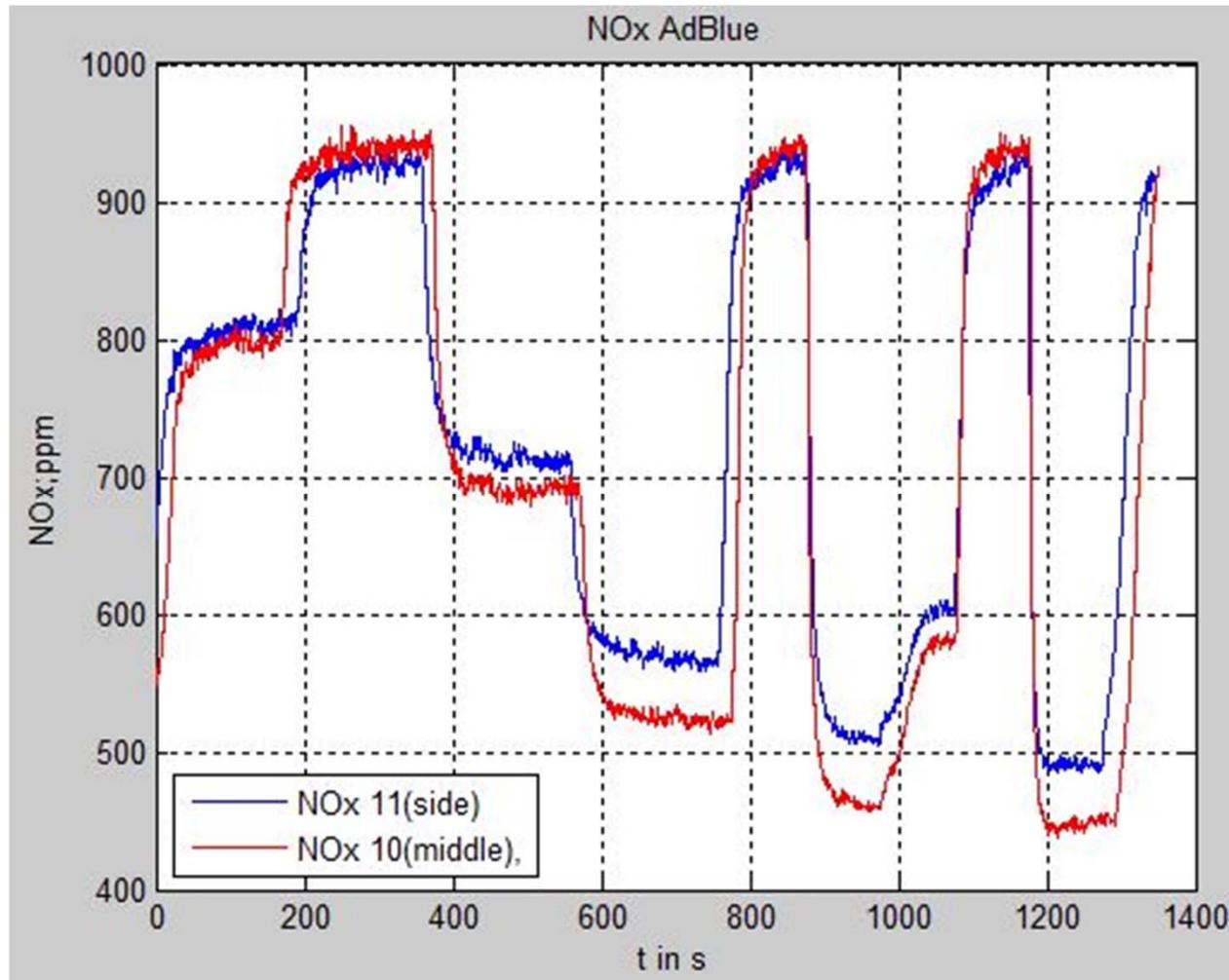
- 
- **NH₃ Sollmengenberechnung auf AdBlue Basis**
 - Kenntnis von O₂, CO₂, NO_x erforderlich
 - Arbeitspunkt bei 1800U/min und 22mg/str verwendet
 - Bestimmung der Luftmasse über Abgaszusammensetzung im Arbeitspunkt
 - Addition der Treibstoffmenge → Abgasmasse
 - Mit Anteil aus Horiba- Messung molar auf Massenanteil umrechnen (Mol NO_x/s)
 - Mol NH₃ = Mol NO_x (Reduktion 3 vernachl.)
 - →Masse NH₃ soll
 - Zur Kontrolle, NH₃ über Volumen des gedostes NH₃
 - Abweichungen soll/ist hier von rund 70 ppm durch:
 - Oxidation (Hauptkomponente)
 - durch Messungenauigkeit Volumenmessung AdBlue
 - Ungleichverteilung über Abgasrohr
 - syst. Messfehler Horiba durch Verschmutzung

- Positionsauswertung der Entnahmestelle

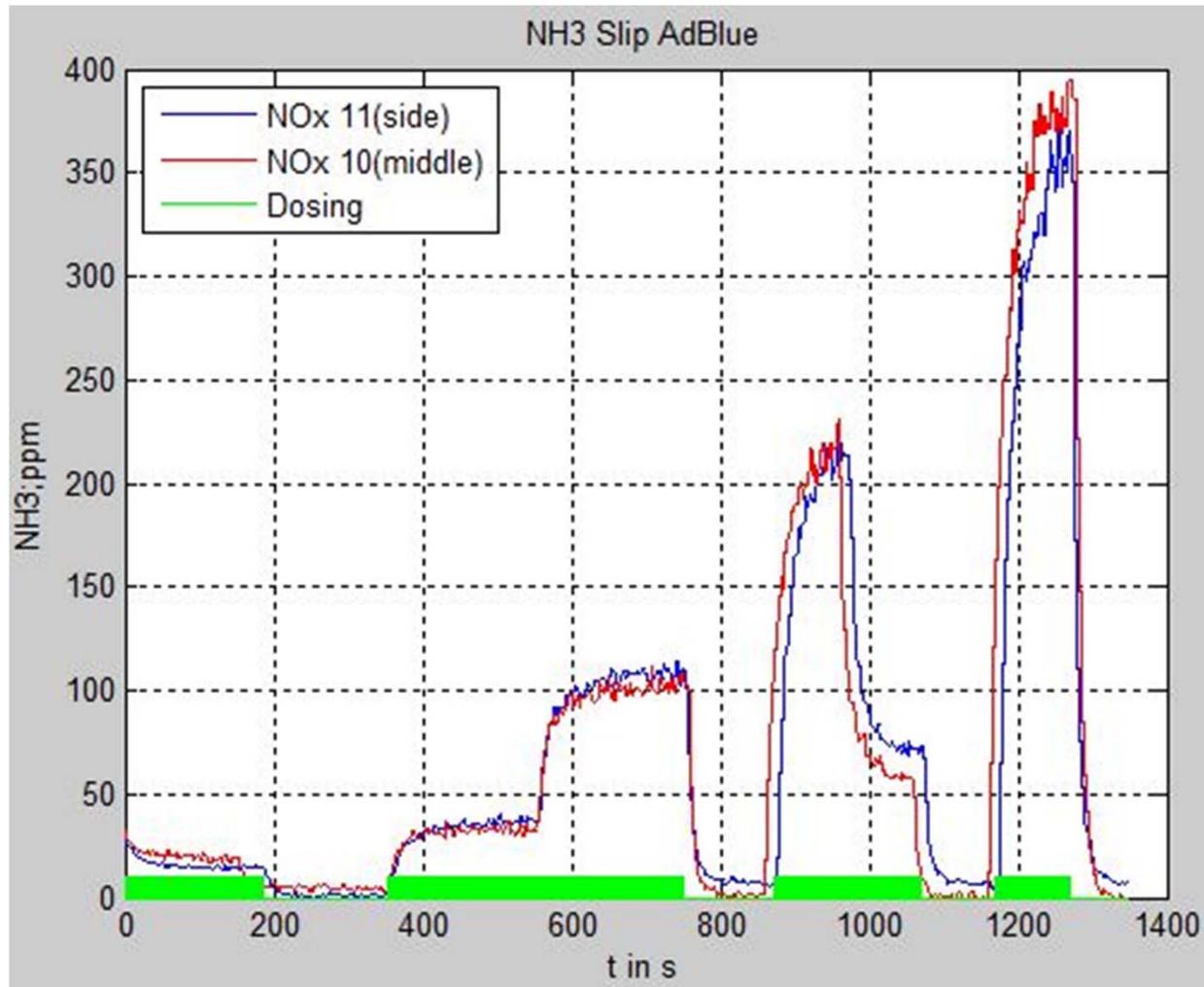


- Zwei Messungen in der Mitte und am Rand mit jew. Flüssig- und gasförmiger Dosierung
- Gleiche Dosingschritte
- Erkenntnis:
 - O₂, CO₂, COH nicht von Messposition abhängig
 - NO_x hat const. Offset (durch andere Luftfeuchtigkeit an den verschiedenen Messtagen)
 - NH₃ so gut wie nicht von Messposition abhängig

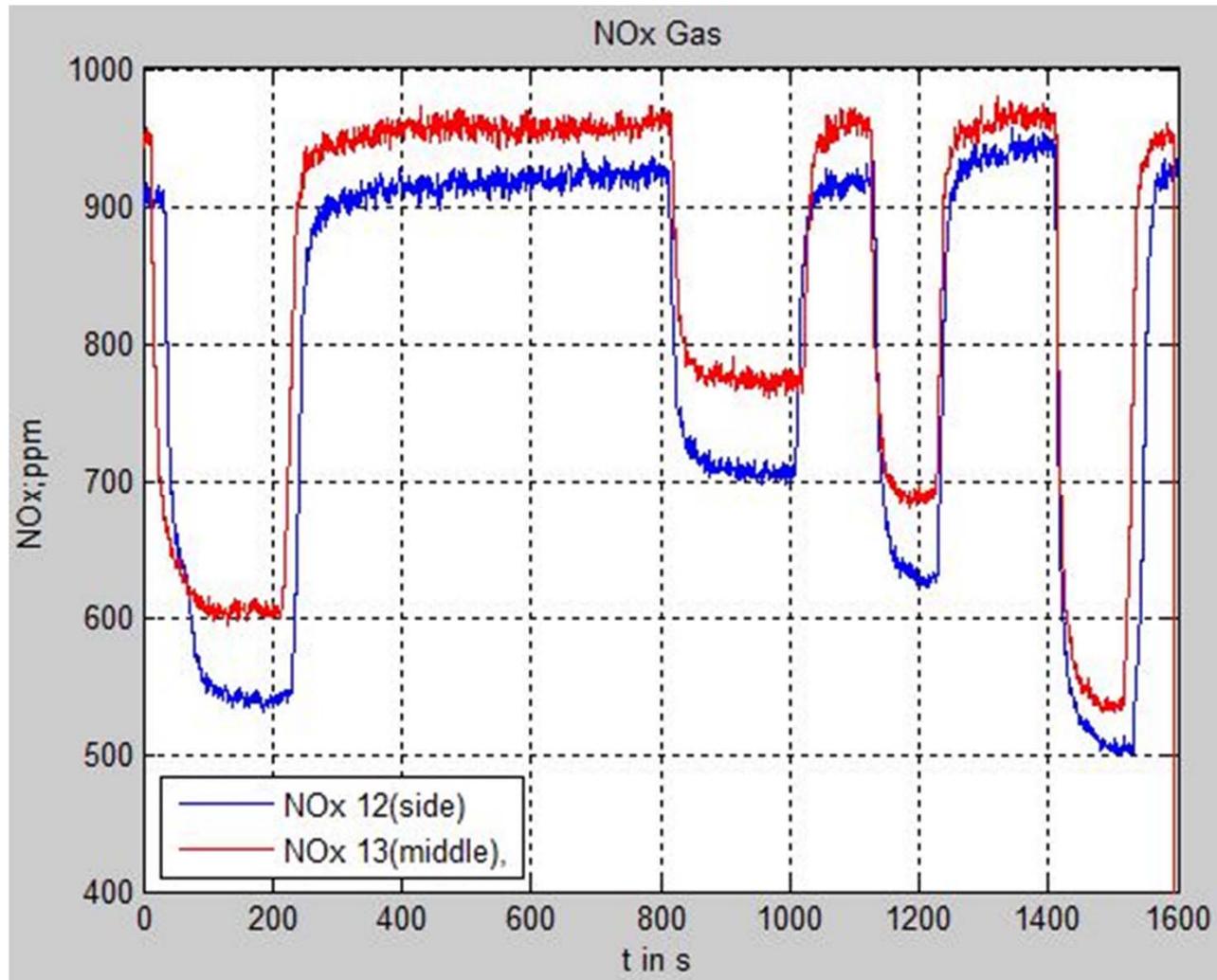
- NOx- Vergleich bei AdBlue Dosierung



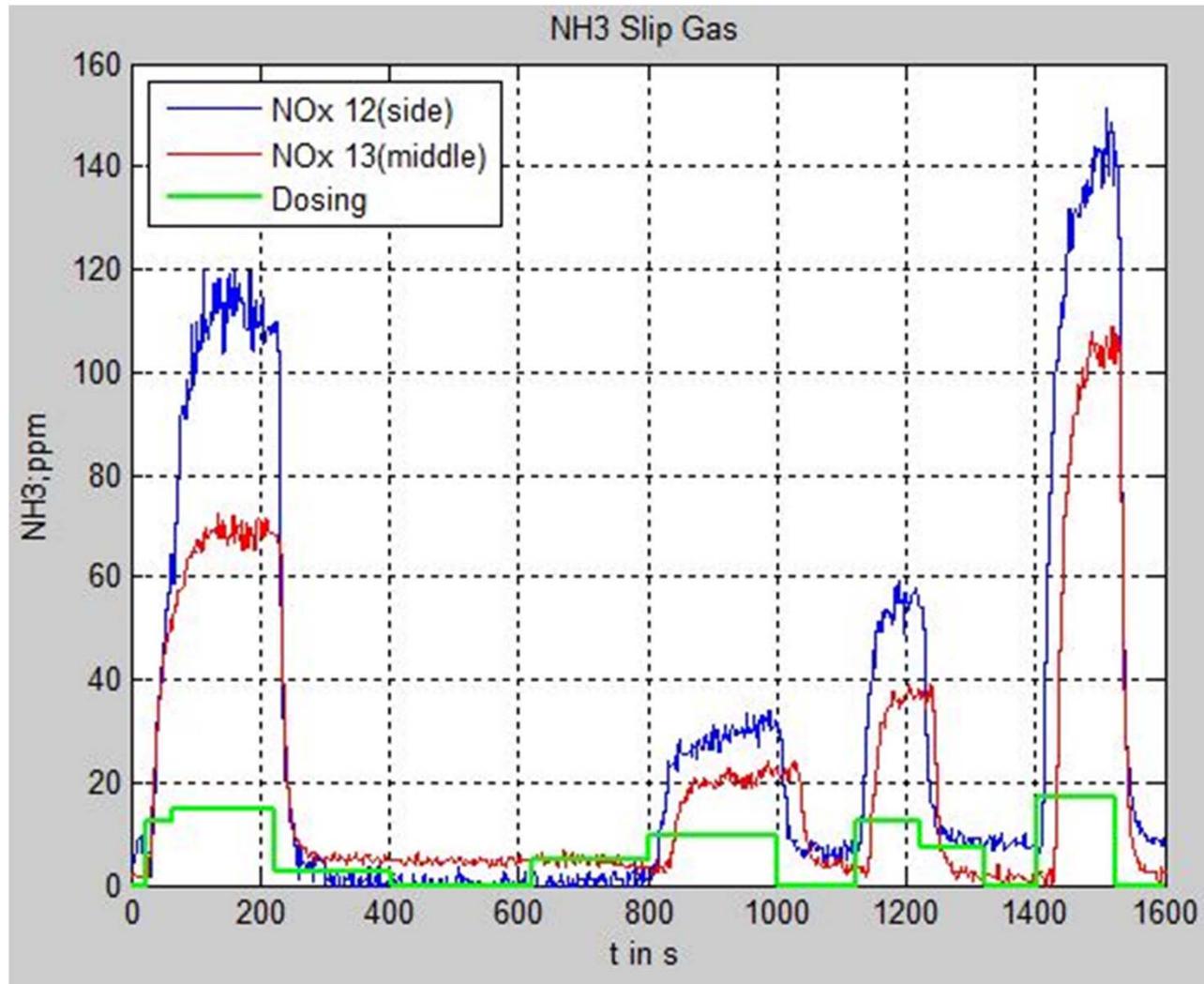
- NH₃-Vergleich bei AdBlue Dosierung



- NO_x-Vergleich bei gasförmiger Dosierung



- NH₃-Vergleich bei gasförmiger Dosierung



- 
- **Fazit:**
 - Flüssige Dosing fast Problemfrei
 - Gasförmiges Dosing:
 - Probleme unter 8 mg/s Dosing (minimale Abgabemenge)
 - Geringe variable Abweichungen durch NH₃ Ungleichverteilung im Abgas (Stromlinien)
 - Oxidation des NH₃ muss berücksichtigt werden beim optimaler Dosierung und max Slip von 10ppm
 - Beachtung der Umgebungsbedingungen
 - NO_x durch Luftfeuchtigkeit beeinflusst
 - AdBlue durch Umgebungstemperatur
 - Position aber nur wenig Einfluss auf Ergebnis (geringer Rohrdurchmesser ca. 7cm)

Vergleich der Dosierverfahren

- Vor/ Nachteile AdBlue Dosierung
 - + An allen Tankstellen erhältlich (Kanisterware)
 - + Kein Einfluss auf Wartungs- und Ölwechselintervalle
 - + gute Umweltverträglichkeit des Zusatzstoffes
 - + einfach handzuhaben
 - + leichte Aufbewahrung
 - + gute Gleichverteilung im Abgas
 - Gefrierpunkt bei -1°C , Zersetzung bei $+60^{\circ}\text{C}$
 - Druckpumpe, Ventile, Düse erforderlich
 - Auskristallisation bei geringen Abgastemperaturen
 - (-) Hydrolyse erst ab 130°C möglich
(jedoch Kat sowieso erst ab 180°C einsatzbereit)



- **Vor/ Nachteile NH₃ Dosierung**

- + Kein Temperaturbereich für Lagerung (frieren, Zersetzung)
- + Kein Auskristallisieren
- + Nur Massenstromregler erforderlich
- + Ammoniak sofort verfügbar (dynamisches Dosing mögl.)
- (+) Auch bei niedrigen Temperaturen einsetzbar, aber NH₃ Slip weil SCR noch nicht warm genug
- umständliche Handhabung/ Betankung/ Speicherung
- Nicht überall erhältlich
- schlechtere Gleichverteilung im Abgas (Stromlinien)
- Sicherheitsrisiko im Straßenverkehr durch Giftigkeit



- **Vor/ Nachteile SCR generell**

- + Beseitigung giftiger Abgaskomponenten
- + Reduktionsprodukte umweltfreundlich
- + Erfüllung der Abgasnormen
- + geringere Abgasrückführraten möglich (Effizienter → weniger Verbrauch)
- Kosten durch Zusatzstoff
- Kosten durch teures System, Entwicklung
- Entsorgung, (Schadstoffe, giftige Stoffe, seltene Erden)
- Wartung und Instandhaltung

- **All in all**

- Auf Anwendung abzustimmen
- In unserem Fall Flüssigdosierung problemfreier
- Für mobile Anwendung Flüssigdosierung praktischer



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Sind Fragen aufgetreten?