

Diplomarbeit:

Titel: Design eines virtuellen NOx-Sensors für die NOx-Rohemissionen eines HD-Dieselmotors (mit externer AGR und Ladedruckregelung)

Autor: Bernhard Winkler-Ebner
Betreuung: Prof. Dr. Luigi del Re
Partner: MAN Nutzfahrzeuge Österreich AG
Fertigstellung: September 2009

Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigte sich mit der Modellierung der Stickoxid (NOx)-Rohemissionen eines Nutzfahrzeug-Dieselmotors mit externer Abgasrückführung (AGR) und Ladedruckregelung. Das erstellte Modell ist datenbasiert und weist eine polynomiale Struktur auf. Es besteht aus mehreren lokalen Modellen, die durch Umschaltung ein Gesamtmodell bilden. Die zur Identifikation der Modellparameter notwendigen Daten wurden über D-optimale Versuchsplanung geplant und automatisiert am Motorprüfstand gemessen. Im Anschluss wurden die Modellparameter identifiziert und eine umfangreiche dynamische und stationäre Modellevaluierung durchgeführt. Für die Evaluierung wurden vor allem gängige Nutzfahrzeug-Testzyklen (ESC, ETC, WHSC, WHTC) verwendet. Weiters wurden alternativ zum rein polynombasierten Modellansatz noch weitere Ansätze getestet: Zum einen ein rein kennfeldbasiertes Modell, sowie eine Kombination aus Kennfeldern und identifizierten Polynomstrukturen.

Solche Modelle, welche auch als virtuelle Sensoren bezeichnet werden, könnten zur Bereitstellung der NOx-Rohemissionen für eine On-Board-Diagnose oder für die Steuerung der Harnstoffeinspritzung für SCR-Katalysatoren in Nutzfahrzeugen verwendet werden.

Einführung:

Stickoxidbildung:

In der Literatur sind 3 Hauptbildungsmechanismen zu finden:

1. Thermisches NOx (Zeldovich-Mechanismus)
2. Promptes NOx
3. Brennstoff NOx

Der Zeldovich-Mechanismus, der die starke Temperaturabhängigkeit des Prozesses beschreibt, ist der dominante. Aus ihm können folgenden 3 Haupteinflussgrößen abgeleitet werden:

1. Brennraumtemperatur
2. Verweildauer bei hohen Temperaturen
3. Sauerstoffangebot im Brennraum

Zur Bestimmung dieser Einflussgrößen wurden 8 Motormessgrößen als Modelleingänge ausgewählt: Drehzahl, Gesamteinspritzmenge, Ladedruck, Sauerstoffgehalt im Abgas, Spritzbeginn der Haupteinspritzung, angesaugte Frischluftmasse, Ladelufttemperatur und Raildruck.

Modellbildung:

- Als Modellansatz wurde ein Polynommodell 2.Ordnung gewählt
- 4 Teilmodelle werden verwendet um den gesamten Arbeitsbereich zu modellieren
- Die Auswahl der Daten zur Identifikation der Modellparameter erfolgte über D-optimale Versuchsplanung

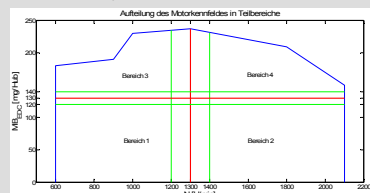
Weitere Themen

Modellstruktur:

Polynom 2.Ordnung:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_{1i}x_i + \sum_{i,j=1}^k a_{2ij}x_i x_j$$

Aufteilung des Motorkennfeldes in 4 Teilbereiche für lokale Polynommodelle:



D-optimale Versuchsplanung

D-Kriterium allgemein: $J_D(\phi) = \det((\phi^T \phi)) = \max_{\phi \in \Omega} (\det(\phi^T \phi))$

Maximieren der Determinante der Informationsmatrix $\Phi^T \Phi \rightarrow$ verbesserte Berechenbarkeit der Modellparameter

Verwendetes erweitertes D-Kriterium:

$$J_D^*(\phi) = -|\phi^T \phi| + k \cdot \min_{i=1..n} (\sqrt{(\phi^T \phi)^{-1}})_{ii}$$

Erweiterung um eine Gewichtung des minimalen Abstandes zwischen den Punkten

Least-Squares Identifikation:

Polynomansatz allgemein:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_1 + a_{12} x_1 x_2 + \dots + a_{11} x_1^2 + \dots + a_m x_m^2 + \dots$$

In Parametern lineares Regressionsproblem

$$y_i = \phi_i^T \theta + \varepsilon_i$$

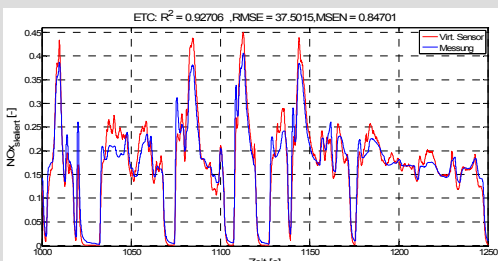
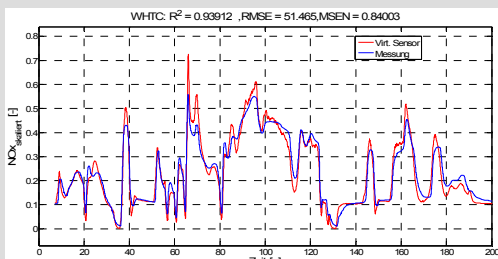
$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}, \phi = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \dots \\ \phi_n \end{bmatrix}, \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}, \theta = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_m \end{bmatrix}$$

$$Y = \phi \theta + \varepsilon$$

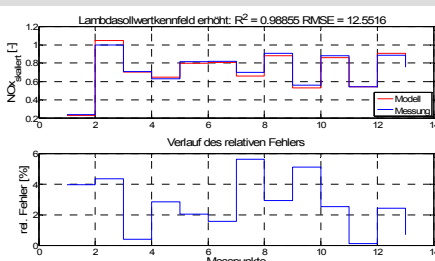
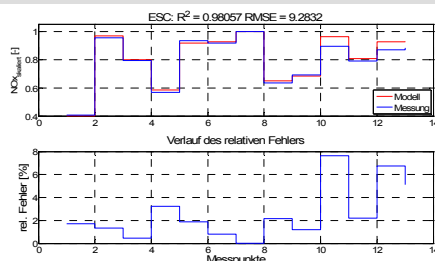
Least-Squares-Formel:

$$\hat{\theta} = H^{-1} \sum_{i=1}^n \phi_i y_i = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T Y$$

Ergebnisse - dynamisch



Ergebnisse - stationär



Schlussfolgerung und Ausblick

Vorteile:

- Sowohl stationär als auch dynamisch gute Ergebnisse \rightarrow unter Prüfstandsbedingungen
- Wahl der Identifikationsdaten mittels D-optimaler Versuchsplanung
- Bewährter Polynomansatz ausreichend, wenn mehrere lokale Teilmodelle gebildet werden
- Keine besondere Prüfstands-ausstattung oder Software notwendig (keine DoE-Tools usw.)
- Prüfstandsmessungen erfolgten automatisiert
- Weiteres Verbesserungspotential gegeben
- In Zukunft möglicher Ersatz für physikalische NOx-Rohemissionssensoren für On-Board-Diagnosesysteme oder SCR-Katalysatoren

Nachteile:

- Tests im Fahrzeugeinsatz notwendig \rightarrow Test unter realen Bedingungen
- Datenbasiertes Modell gilt nur für einen Motortyp \rightarrow keine Übertragbarkeit auf andere Motoren ohne neue Messungen
- Altersbedingte Änderungen nicht erfassbar