

Diplomarbeit:

Entwurf eines virtuellen Sensors der Partikel- und Stickoxidbildung eines DE Dieselmotors

Autor: Daniel Alberer
Betreuung: Prof. Dr. Luigi del Re
Partner: LCM Linz
Fertigstellung: Mai 2005

Kurzbeschreibung

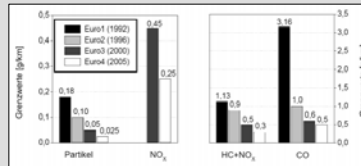
Die Arbeit beschäftigt sich mit der Realisierung einer dynamischen Modellierung der beiden Emissionsgrößen Stickoxide und Russ, einem *virtuellen Sensor*. In einem ersten Teil wird der Stand der Technik für die Abgasformierung in der dieselmotorischen Verbrennung erläutert, sowie deren Beeinflussung durch die am Motor vorhandenen Stellgrößen. Anschließend werden die Grundlagen für die verwendeten Identifikationsmethoden zusammengefasst. Neben den klassischen linearen Verfahren wie ARX, FIR usw. und der Methode der neuronalen Netze wird der Ansatz der genetischen Programmierung präsentiert. Die Analysen erfolgten am Motorenprüfstand des Instituts an einem BMW-Dieselmotor M47D. Der Prüfstand von AVL erlaubt einen dynamischen Betrieb des Motors im gesamten Betriebsbereich. Ein späteres Ziel ist die prädiktive Regelung des Motors. Dabei kann z.B. unter Einhaltung der Emissionsgrenzwerte der Verbrauch für den Zyklus minimiert werden. Die vorliegende Arbeit des virtuellen Sensors der Emissionen liefert eine Basis für diesen Optimierungsvorgang.

Die in der Literatur vorgestellten Modelle konzentrieren sich auf eine Abbildung des stationären Emissionsverhaltens. PKW-Motoren werden bekanntlich dynamisch betrieben, weshalb die stationären Schätzer versagen. Die Skala der Modellierungsvarianten reicht von rein empirischen Modellen bis hin zu sehr detaillierten 3D CRFD-Modellen. Die empirischen Modelle stellen lediglich Approximatoren der Messdaten dar und liefern deshalb meist eine bescheidene Darstellung der Vorgänge. 3D CRFD-Modelle auf der anderen Seite sind höchst rechenzeitintensiv und mit den heutigen Mitteln nicht mit der notwendigen Exaktheit lösbar. Hier wird nun ein weitgehend neuer Ansatz für die Modellierung der Emissionen im transienten Betrieb mittels genetischer Programmierung vorgestellt. Physikalisches Vorwissen kann bei der Lösungsfindung Einfluss nehmen, während die Komplexität bedeutend geringer ist als bei einer CRFD-Modellierung. Mittels statistischer Methoden wird vorerst ein stationäres Modell erstellt. Dieses Modell dient dann zusätzlich zu vorhandenem Expertenwissen als Grundlage für die dynamische Modellbildung mit genetischer Programmierung. Bei der genetischen Programmierung werden nicht nur Modellparameter identifiziert, sondern auch dessen Struktur. Als Resultat erhält man eine analytische Formulierung. Es handelt sich dabei also um ein strukturiertes Testen von physikalischen Hypothesen. Sind die relevanten Eingangsgrößen für das Modell vorhanden, so kann mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eine Abbildung der Zusammenhänge erkannt werden.

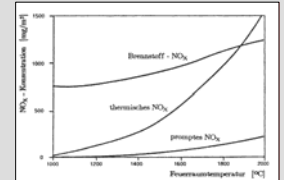
Die Methode der genetischen Programmierung wird in weiterer Folge mit ARMAX und mit künstlichen neuronalen Netzen verglichen. Bei diesen Methoden kann im Vorhinein jeweils nur die Struktur festgelegt werden (Eingangsgrößen, Ordnung...); Physikalisches Vorwissen kann kaum eingebracht werden. Anschließend werden die Parameter optimiert. Anhand der Validierung an einem Normzyklus werden die Vorzüge der genetischen Programmierung aufgezeigt. Obwohl nur ECU-Messgrößen als Eingänge dienen, ist die Prädiktion beachtlich. Die gegenwärtige Arbeit stellt den Anfang für ein interessantes und entspannt zeitgemäßes Forschungsgebiet dar. Für weiterführende Untersuchungen ist durchaus noch Potential vorhanden.

Gesetzgebung

- Dieselanteil für KFZ nimmt zu
 - Hohes Moment bei niedriger Drehzahl
 - Sparsamer Kraftstoffverbrauch
 - Geräuschemissionen („Nageln“) stark verbessert
- Abgasgesetzgebung wird zunehmend verschärft
 - Vor allem wegen der Partikel und NOx-Emissionen gerät der Dieselmotor in Verruf



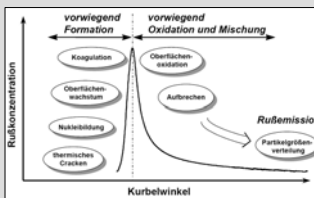
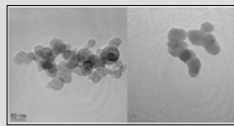
Stickoxide - NOx



- Oxidationsprodukte des Stickstoffs - NO und NO₂
- Promptes, Brennstoff und Thermisches NOx
- Beschreibung durch Zeldovich-Mechanismus
- Hohe Temperaturabh. - Heywood-Bildungsrate von NO

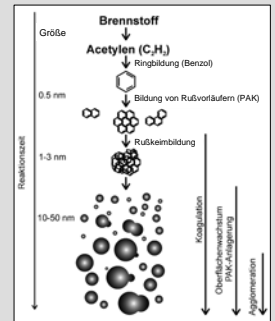
$$\frac{d[NO]}{dt} = 6 \cdot 10^{16} \cdot e^{-\frac{69000}{T}} \cdot [O_2]^{1/2} \cdot [N_2] \text{ mol / cm}^3 \cdot \text{s}$$

Partikelemissionen - PM

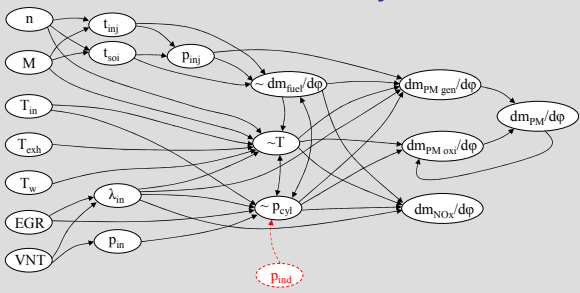


- Teilchenneubildung
- Oberflächenwachstum
- Koagulation
- Agglomeration
- Rußoxidation

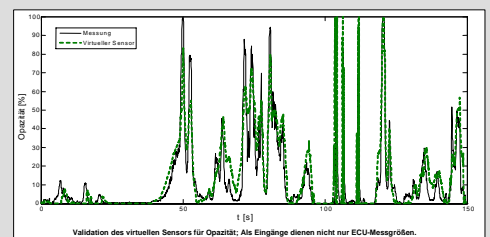
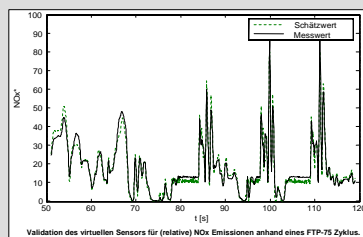
- Sehr hohe Rußbildung während des Verbrennungsvorgangs
- Großteil wird wieder oxidiert



Inferenzanalyse



Ergebnisse



Kompensation der Sensordynamik

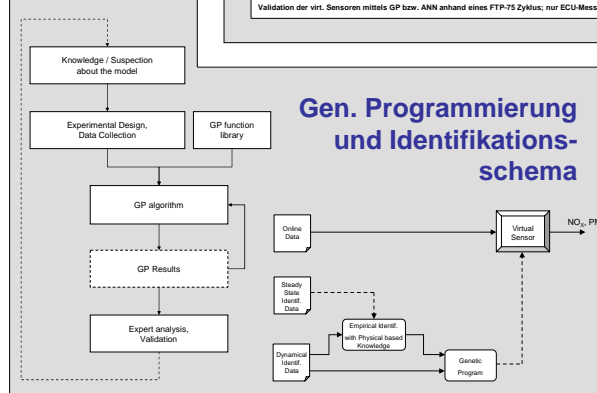
- Sensordynamik soll nicht identifiziert werden
- Vor allem Temperatursensoren in Luft träge
- → „Invertierung“ der Sensordynamik

$$G = \frac{1}{1+s \cdot T_v} \rightarrow G \cdot H_{Invers} = 1 \rightarrow H_{real} = \frac{1+s \cdot T_v}{1+s \cdot T_v \cdot T_{ECU}}$$

Schlussfolgerungen

- Gen. Programmierung neue Methode zur Emissionsmodellierung
- Partikelmodellierung schwieriger – mehr Potential für die Zukunft
- Kompensation der Sensordynamik essentiell
- Trübungsmessung nicht optimal – Spektralanalysator besser (aber langsamer)
- Kombination TL – AGR nichttrivial → MIMO-Regelung zweckhaft
- Ergebnisse zufriedenstellend – besser als ANN
- BJ-Modelle nicht geeignet (höchst nichtlinearer Prozess)
- Für NOx ist eine Zyklus-Optimierung mit bereits wenigen Parametern möglich
- Wahl der Identifikationsdaten nicht einfach, aber entscheidend
- Um Phänomene optimal darstellen zu können → wären viele zum Teil nicht realisierbare Sensoren notwendig
- Überparametrisierung liefert schlechtere Qualität → kompaktes, robustes Modell besser
- Ergebnis von GP = analytische Formulierung!

Gen. Programmierung und Identifikations-schema



Ausblick

- Beachtliche Ergebnisse - Allgemeingültigkeit noch zu prüfen
- Physikalische Deutung schwierig, da bei mehreren Durchläufen unterschiedliche Ergebnisse
- Formeln herausfinden bei mehreren Durchläufen
- GP-Echtzeitvariante in Entwicklung
- Weiterführende Untersuchungen an einem Common-Rail Motor
- Versuchsplanung (Bestmögliche Anregung des Systems bei vorgegebener Rechnerleistung)
- Kompensation der Totzeiten/Sensordynamik
- ANN verbessern → Vergleich zu GP