

Diplomarbeit:

Emissionsgeführte Closed-Loop Regelung eines PKW Dieselmotors

Author: Christoph Rafetzeder

Betreuung: Prof. Dr. Luigi del Re

Finished: November 2012

Kurzbeschreibung

Bei modernen Dieselmotoren können die ausgestoßenen Stickoxide (NO_x) und der Feinstaub (PM) als wichtigste Emissionskomponenten angesehen werden. Gerade diese beiden Komponenten können für den Menschen bei erhöhter Belastung zu gesundheitlichen Problemen, wie Krebserkrankungen, führen. Konsequenterweise werden diese Größen daher durch den Gesetzgeber im Rahmen immer strenger werdender Emissionsbestimmungen berücksichtigt. Mittlerweile finden auch variable Grenzwerte der Einzelfahrzeuge Interesse um den Gesamtausstoß, speziell im städtischen Verkehr, zu limitieren. In aktuellen Systemen zur Schadstoffreduzierung wird das Abgas nach dem Motor im Abgastrakt nachbehandelt um die geforderten Emissionsgrenzen zu erfüllen, dies ist oft mit zusätzlichen Kosten und einer Erhöhung der Systemkomplexität verbunden.

In dieser Arbeit wird das Potential einer emissionsgeführten Regelung durch Eingriffe im Luftpfad des Motors untersucht, um bereits die Rohemissionen vorgegebenen Referenzen zu unterwerfen. Die Grundlage zur Modellierung bilden polynomiale ARX-Modelle, welche sowohl für die Beschreibung des Luftpfades als auch zur Bestimmung des nichtlinearen Schadstoffmodells herangezogen werden. Durch die polynomiale Modellstruktur können auch komplexe Zusammenhänge, wie etwa die NO_x-Formierung, modelliert werden. Die somit resultierende NARX Modellstruktur (Nichtlineares ARX-Modell) beinhaltet die Nichtlinearität lediglich in den Regressoren und ist linear in den zu bestimmenden Parametern, wodurch eine explizite Parameterschätzung möglich ist. Der problematischen Extrapolationseigenschaft von Polynomen höherer Ordnung außerhalb des gültigen Wertebereichs, speziell der autoregressiven Terme, konnte durch eine tanh-Transformation für die auf [-1, ..., +1] normierten Daten, entgegengewirkt werden.

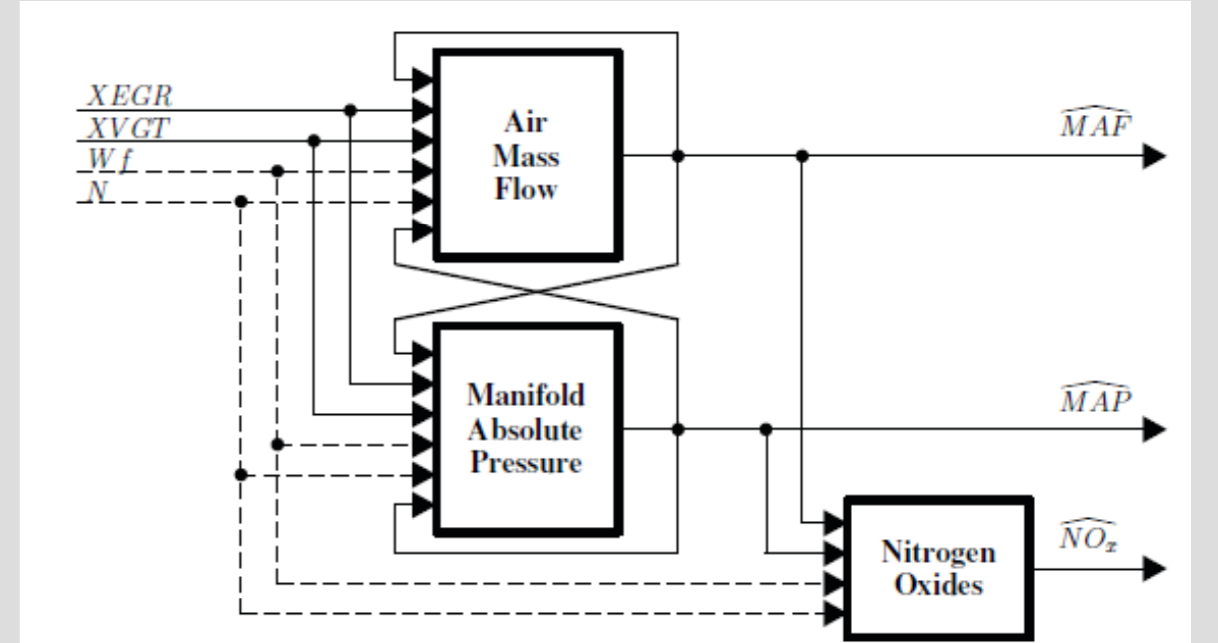
Als modellbasiertes Regelverfahren wird die Theorie der Sliding-Mode Regelung mit äquivalenter Dynamik verwendet, welches während der Sliding-Mode Phase zu einer modellunabhängigen Sliding-Mode Dynamik führt und somit als sehr robust gilt. Die zeitkontinuierliche Regelungsmethode ist auch auf nichtlineare Systeme anwendbar und wird in dieser Arbeit über die Euler- und Differenzenquotienten-Approximation erfolgreich am zeitdiskreten System angewendet. Wie auch bei vielen nicht prädiktiven Regelverfahren erfordert die Sliding-Mode Theorie minimalphasige Systeme, wodurch der Einfluss der Turbinenleitschaufelstellung für das Regelungskonzept nicht zugänglich ist. Dieser Störereffekt wurde daher für ein adaptives Steuergesetz herangezogen um kritische Referenzvorgaben, natürlich innerhalb der physikalisch möglichen Grenzen, zu erreichen ohne die Regelstrecke zu destabilisieren.

NARX-Modellstruktur

Zustände: MAF & MAP
Stellgrößen: XVGT & XEGR
Störgrößen: Wf & N

Annahmen:
• Dynamik durch Luftpfad modelliert
• Polynomiales NO_x-Modell (Modell A: mg/cycle, Modell B: ppm)

Identifikationsdaten:
Eingänge: Generiert durch Design-of-Experiment (DoE)
Modellausgänge:
• EURO-4 Mittelwerts-Simulationsmodell
• Messung an EURO-5 Prüfstandsmotor



Parameteridentifikation

**Nichtlinear in Regressoren
Linear in Parametern**

$$\hat{y}(k) = \varphi^T(k)\theta$$

$$\varphi^T(k) = \left[\underbrace{\dots}_{\text{konst.}} \quad \underbrace{x_1(k) \dots x_n(k)}_{\text{lineare Terme}} \quad \underbrace{x_1(k)x_1(k) \quad x_1(k)x_2(k) \quad \dots \quad x_{n_a}(k)x_{n_a}(k)}_{\text{Terme höherer Ordnung}} \quad \dots \quad x_{n_a}(k)^l \right]$$

Box-Cox-Transformation

$$y(k)^{(\lambda)} = \begin{cases} (y(k)^\lambda - 1) / \lambda & \lambda \neq 0 \\ \ln y(k) & \lambda = 0 \end{cases}$$

Tanh-Transformation für autoregressive Terme

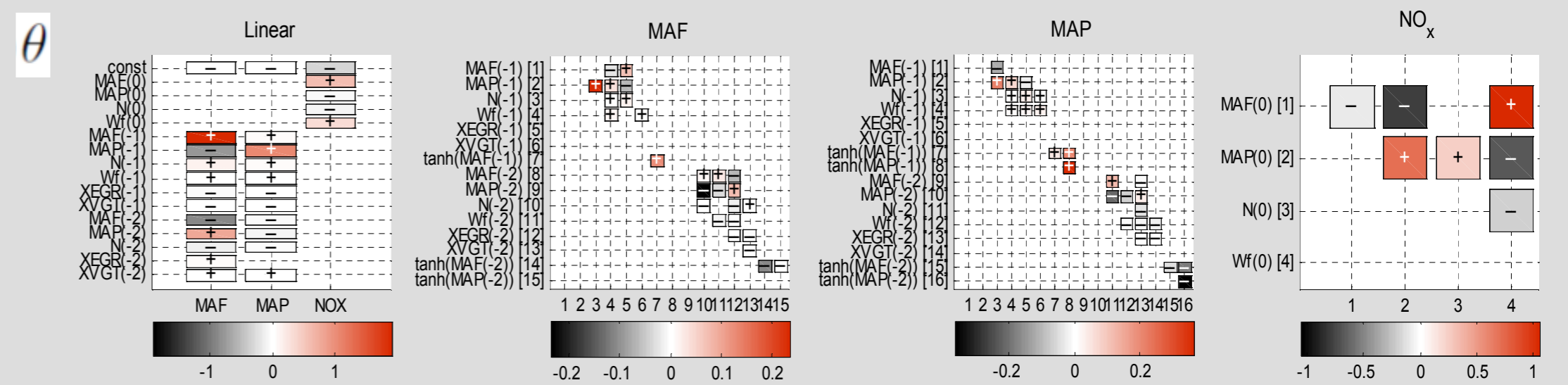
$$x_a(k-i) \cdot x_b(k-i) \rightarrow \tanh(x_a(k-i)) \cdot \tanh(x_b(k-i)) \quad i \in \{1, 2\} \quad x_a, x_b \in \{MAF, MAP\}$$

Eingangsaffine Modellstruktur für Sliding-Mode Regelung

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad x_a(k-1) \cdot x_b(k-1) \rightarrow 0 \quad x_a, x_b \in \{XEGR, XVGT\}$$

Backward-Regressor-Selektion (F-Test)

→ Reduktion des vollfaktoriellen Modells auf signifikante Regressoren



Sliding-Mode Regelung

3-Phasen (Eintreff-, Gleitphase und Gleichgewichtszustand)

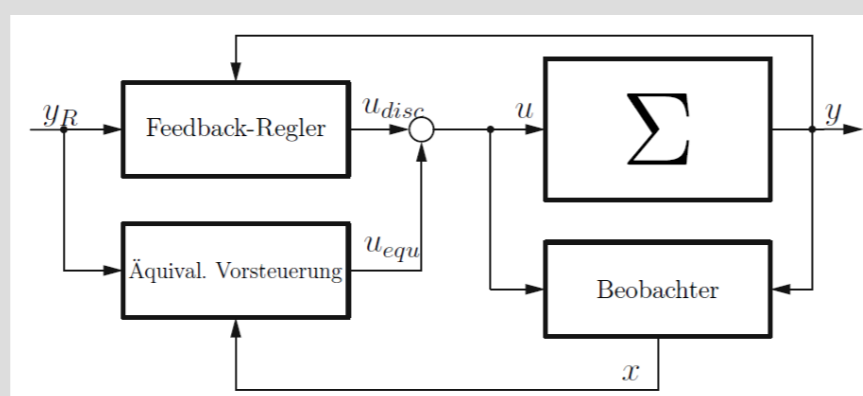
**Design der Schaltfunktion s
Dynamik im Gleitzustand für s=0**

$$s(e; t) = \left(\lambda + \frac{d}{dt} \right)^{r-1} e \quad \text{mit} \quad e = y - y_{ref}$$

Direkter Erreichbarkeitsansatz Äquivalente Systemdynamik

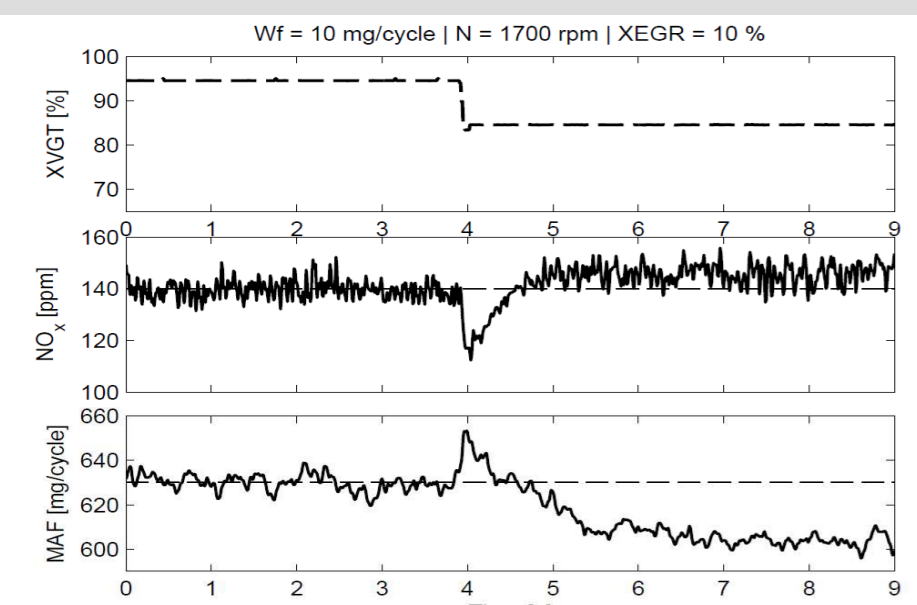
$$\dot{s} = -Q \text{sign}(s) - Ks$$

$$\dot{s} = \frac{\partial s}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial s}{\partial x} (f(x, t) + g(x, t)u_{eq}) = 0$$

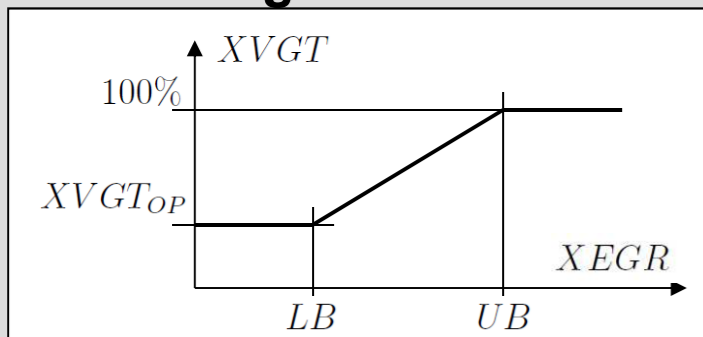


Umsetzung am EURO-5 Dieselmotor

Nichtminimalphasigkeit durch XVGT



→ Vorsteuergesetz für XVGT



Anti-Chattering-Strategie durch Boundary Layer

$$\text{sign}(s_i) \rightarrow \text{sat}(s_i) = \begin{cases} \frac{s_i}{L} & |s_i| \leq L \\ \text{sign}(s_i) & \text{sonst} \end{cases}$$

Zeitdiskretes Streckenmodell & zeitkontinuierliche Regelungsmethode

Euler-Vorwärts und Vorwärts-Differenzenquotient

$$y_{REF}(k+1) \cong y_{REF}(k) \cdot Ts + y_{REF}(k)$$

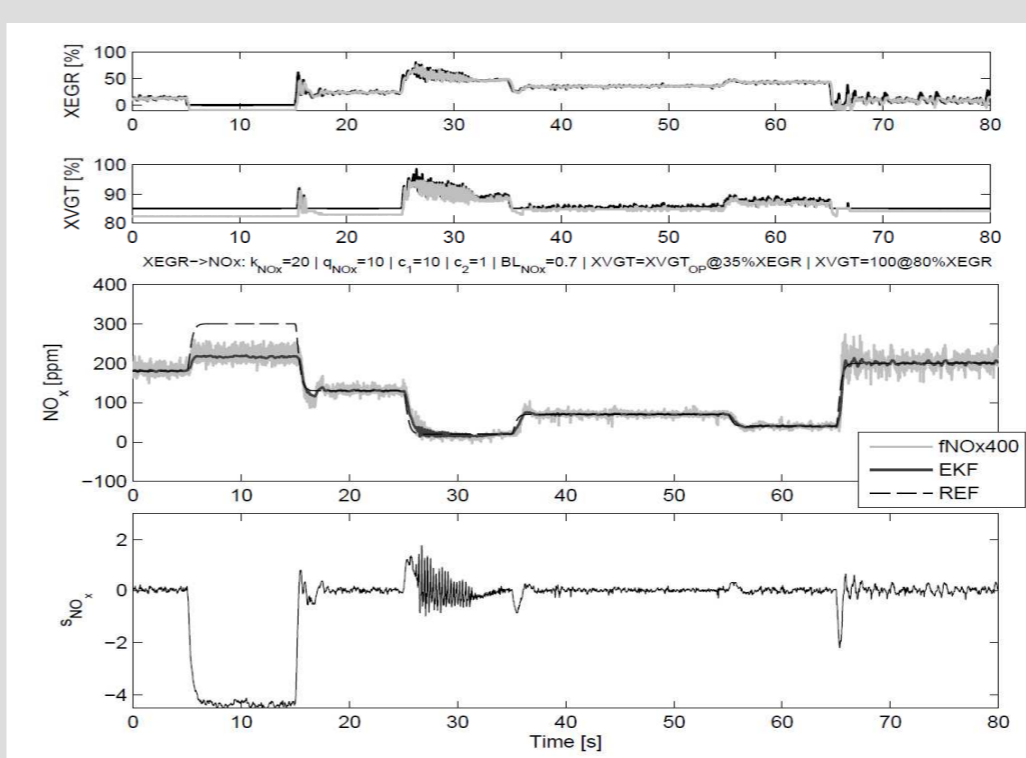
$$\dot{y}_{REF}(k+1) \cong \dot{y}_{REF}(k) \cdot Ts + \dot{y}_{REF}(k)$$

$$\dot{s}(k) \cong \frac{s(k+1) - s(k)}{Ts}$$

Rückwärts-Differenzenquotient

$$\dot{y}(k) \cong \frac{y(k) - y(k-1)}{Ts}$$

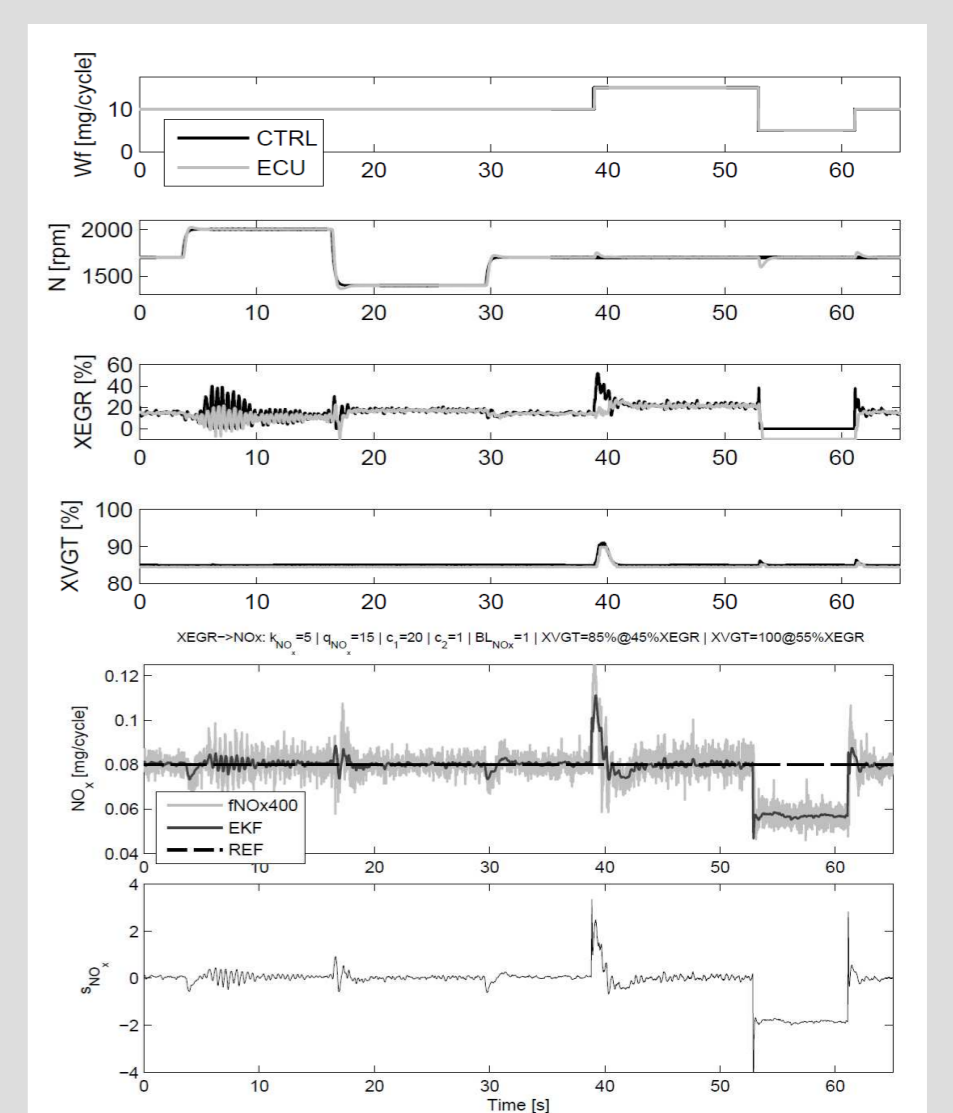
Ergebnisse am EURO-5 Prüfstandsmotor



XVGT-Vorsteuergesetz:

- Geringe Referenzen erreichbar
- Verbesserte Dynamik bei kritischen Vorgaben

- Reduziertes Überschwingen durch größeren Boundary Layer L



Schlussfolgerungen und Ausblick

- Durch Box-Cox-Transformation kann die Modellqualität geringfügig verbessert werden – die Sensitivität des Sliding-Mode Regelung wird jedoch auch transformiert
- Totzeiten sowie unterlagerten Regelkreise der Aktoren beschränken Feedbackperformance
- Minimalphasiges System zur Bestimmung des Sliding-Mode Reglers erforderlich
- Polynomiale autoregressive Terme können zu instabilen Simulationsmodellen führen

- Zusätzliche Einflussgrößen für NO_x-Modellierung (z.B. p_{Rail}, Φ_M, O_{2exh}) → Verbesserte Vorsteuerung → Schaltender Anteil reduzierbar
- Zeitkontinuierliche Modellbeschreibung → Theorie für nichtminimalphasige Systeme im Zeitkontinuierlichen zugänglich