

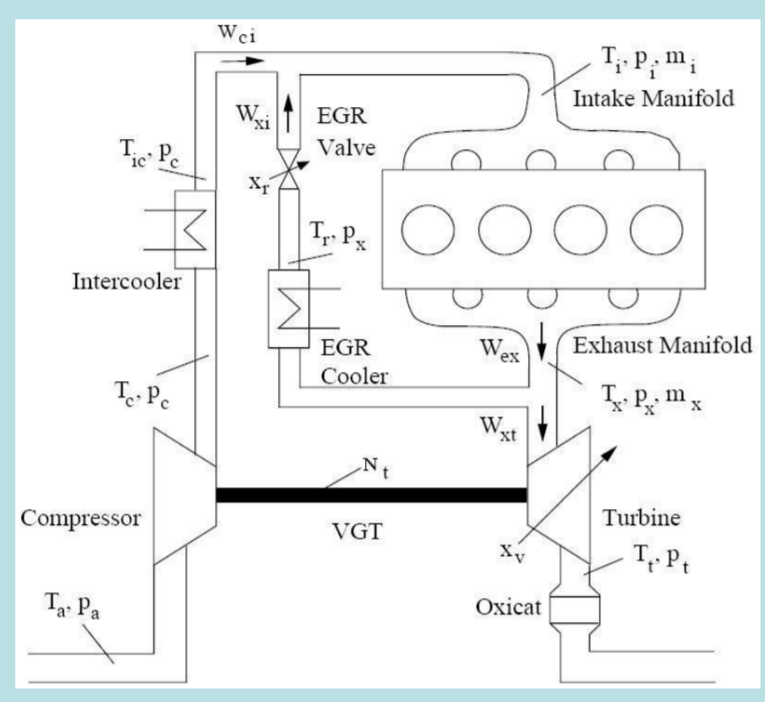
# Masterarbeit:

## Analyse und Optimierung des Einspritzsystems eines Dieselmotors bei transienten Vorgängen

**Autor:** Dieter Grübl  
**Betreuer:** Prof. Dr. Luigi del Re  
DI Harald Waschl  
**Fertigstellung:** November 2013

### Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde nach Möglichkeiten gesucht das Emissionsverhalten eines modernen PKW-Dieselmotors weiter zu verbessern. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Senkung der Stickoxid- und Partikelemissionen. Die bisherige Strategie zur Ermittlung der Zurechnungsparameter der Einspritzung erfolgt mit Hilfe von Optimierung in stationären Punkten. Die so erstellten Kennfelder werden für die Regelung des Verbrennungsmotors auch bei transienten Vorgängen verwendet. Durch die dynamischen Eigenschaften des Systems (z.B. Trägheit des Luftsystems) stimmen die transient vorherrschenden nicht mit jenen bei der stationären Bedingung überein. Daher sind die stationär ermittelten Zurechnungsparameter im transienten Fall nicht notwendigerweise optimal und können zu suboptimalen Verbrauchswerten und Abgasemissionen führen. Als Vergleichsszenario wurde dabei ein Lastsprung bei konstanter Drehzahl gewählt, welcher den Beginn eines Beschleunigungsmanövers simulieren soll. Dabei wurde versucht die Gemischbildung im Hinblick auf den Schadstoffausstoß zu optimieren.



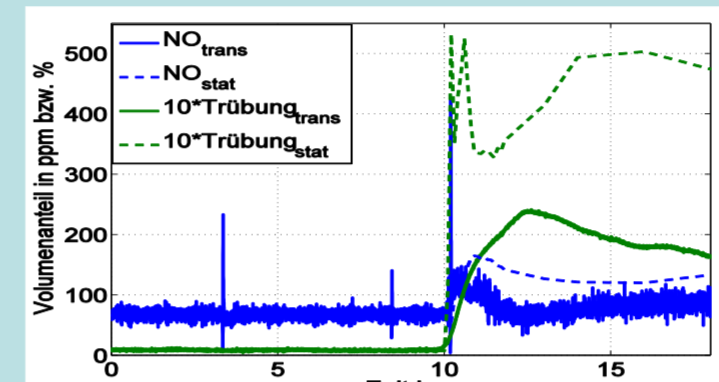
Bei diesem Szenario treten unerwünschte Spitzen im Schadstoffausstoß auf. Um diese zu minimieren wurden mehrere Ansätze untersucht. Im ersten Ansatz wurden verschiedene Methoden getestet, um die Bedingungen zu den Zeitpunkten an denen diese Überschinger auftreten stationär nachzubilden. Der zweite ist ein Optimierungsansatz bei dem die Einspritzparameter aufgrund von am Prüfstand erstellten Modellen optimiert werden. Außerdem wird noch eine Onlineoptimierung durchgeführt, bei der die Messergebnisse des Prüfstandes direkt für die Optimierung verwendet werden.

### Stationäres Nachbilden transient auftretender Zustände

Es wird geprüft, ob sich die transient während eines Lastsprunges auftretenden Verhältnisse im Zylinder stationär rekonstruieren lassen. Dazu werden drei Methoden untersucht.

**Gleiche Luftmasse, Ladedruck und Gesamteinspritzmenge:**

- PI-Regler regeln die Frischluftmasse und den Ladedruck
  - Die Gesamteinspritzmenge wird der ECU vorgegeben und von dieser auf Vor- und Haupteinspritzungen aufgeteilt.
- Momentaufnahmen aus transienter Phase nach dem Sprung stationär einregeln  
→ Vergleich der stationären und transienten Emissionen:
- Stationäre Abgaswerte werden an Zeitpunkte der transienten Momentaufnahmen verschoben
  - und zusammen mit den transienten Abgasverläufen im Bild links dargestellt
  - Keine Übereinstimmung → Versuch nicht zielführend

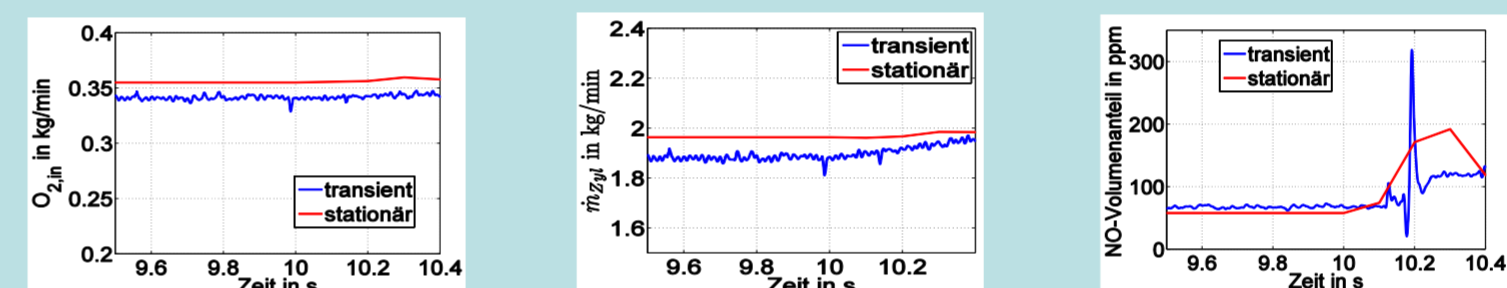


**Gleiches Drehmoment, Zylinderfüllung und Sauerstoffkonzentration im Ein- und Auslasskrümmer:**

- Ein Modellprädiktiver Regler in Verbindung mit einem Kalman Filter regelt die oben genannten Größen
- Prüfung des Ansatzes durch stationäres Anfahren transient durchlaufener Werte analog zu vorherigem Regelkonzept
- Simulationsergebnisse motivieren keinen Prüfstandslauf

**Gleiches Drehmoment, Zylinderfüllung und Sauerstoffmassenstrom in den Motor**

- Wie zuvor wird ein MPC für die Regelung der Größen verwendet
- Wieder sollen die transient durchlaufene Werte stationär angefahren werden
- Gute Simulationsergebnisse motivieren einen Prüfstandslauf
- Erkenntnis:** Durch stationäres Anfahren der transient durchlaufene Werte lassen sich die Emissionen nicht rekonstruieren



## Modellbildung und Offlineoptimierung

### Modellbildung

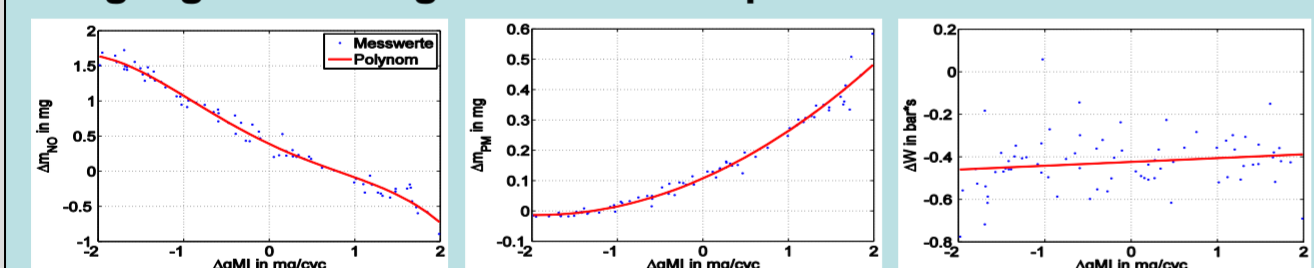
**Lastsprung mit additiver Änderung der Parameter (Eingänge)**

- Haupteinspritzmenge
- Piloteinspritzmenge
- Haupteinspritzwinkel

**Untersuchung der Auswirkungen auf die Ausgänge**

- NO – Ausstoß
- Partikelausstoß (PM)
- Abweichung vom Standarddrehmoment integriert über Bewertungsdauer ( $\Delta W$ )

**Erstellung polynomialer Modelle aufgrund der Eingangs-Ausgangsbeziehungen mit Least Squares Methode**



### Optimierung

**Bildung einer Kostenfunktion aus den neun (3 Eingänge x 3 Ausgänge) Modellen**

$$J = a \cdot (\Delta m_{NO}(\Delta qMI) + \Delta m_{NO}(\Delta qPI) + \Delta m_{NO}(\Delta \phi MI)) + b \cdot (\Delta m_{PM}(\Delta qMI) + \Delta m_{PM}(\Delta qPI) + \Delta m_{PM}(\Delta \phi MI)) + c \cdot (\Delta W(\Delta qMI) + \Delta W(\Delta qPI) + \Delta W(\Delta \phi MI))^2 + d \cdot |\Delta qMI| + e \cdot |\Delta qPI| + f \cdot |\Delta \phi MI|$$

**Minimierung der Kostenfunktion**

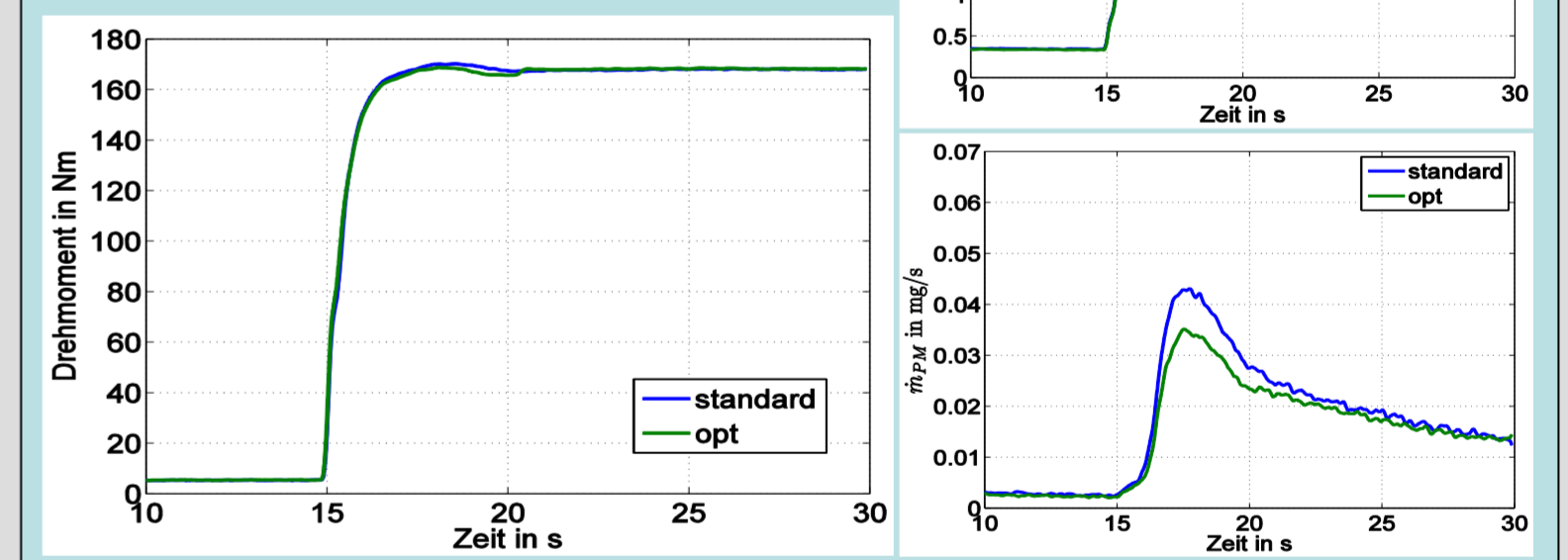
$$\begin{pmatrix} \Delta qMI^* \\ \Delta qPI^* \\ \Delta \phi MI^* \end{pmatrix} = \arg \min_{\Delta qMI, \Delta qPI, \Delta \phi MI} J$$

- s.t.:
- $-2mg / cyc \leq \Delta qMI \leq 2mg / cyc$
  - $-0,7mg / cyc \leq \Delta qPI \leq 0,7mg / cyc$
  - $-2^\circ \leq \Delta \phi MI \leq 2^\circ$

**Manuelle Justierung basierend auf den Erkenntnissen aus der Modellbildung**

### Ergebnisse

- Deutliche Reduzierung der NO – Emissionen
- Geringe Reduzierung der Partikelemissionen (PM)
- Geringe Abweichung von Standarddrehmomentverlauf



## Onlineoptimierung

### Optimierung

**Lastsprung mit additiver Änderung dreier Parameter**

- Haupteinspritzmenge
- Piloteinspritzmenge
- Haupteinspritzwinkel

**Messwertaufbereitung**

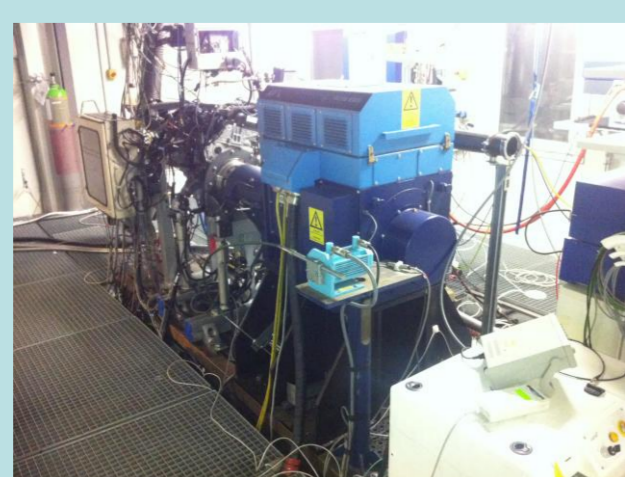
- Bewertungsgrößen
  - NO – Ausstoß
  - Partikelausstoß (PM)
  - Abweichung vom Standarddrehmoment ( $\Delta W$ )
- Mittelung der Messreihen und
- Wiederholung der Messungen bei zu hoher Varianz
- Driftkompensation der Messwerte

**Direkte Auswertung und Lösung des Minimierungsproblems**

- Getrennte Betrachtung von zwei Bereichen
- Lösung eines mehrdimensionalen Optimierungsproblems anstatt der Summe dreier eindimensionaler Optimierungsprobleme

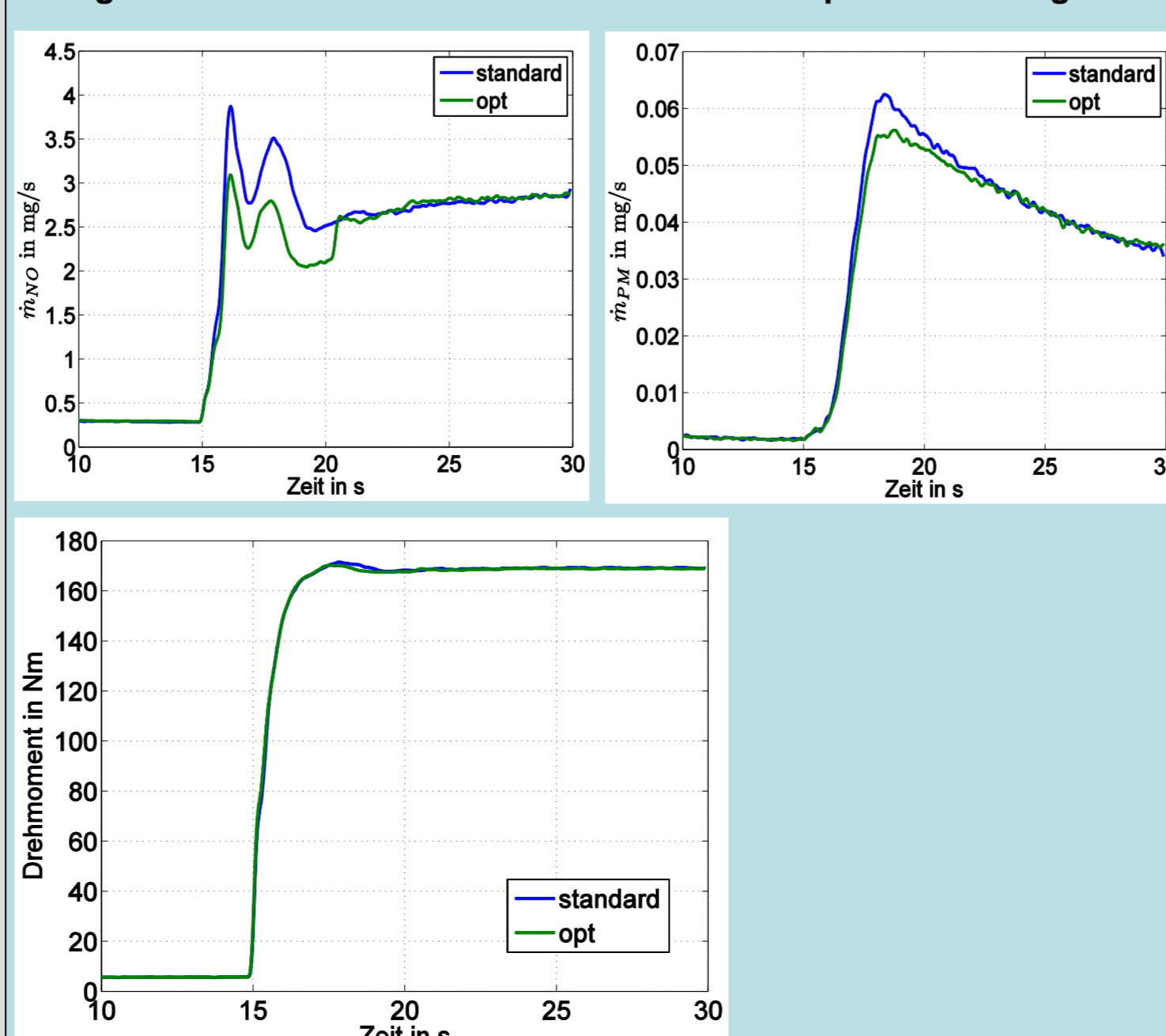
$$\min_{\Delta qMI, \Delta qPI, \Delta \phi MI} (a \cdot \Delta m_{NO} + b \cdot \Delta m_{PM} + c \cdot \Delta W^2)$$

- s.t.:
- $-2mg / cyc \leq \Delta qMI \leq 2mg / cyc$
  - $-2mg / cyc \leq \Delta qPI \leq 2mg / cyc$
  - $-0,7mg / cyc \leq \Delta qPI \leq 0,7mg / cyc$
  - $0,7mg / cyc \leq \Delta qPI \leq 0,7mg / cyc$
  - $-2^\circ \leq \Delta \phi MI \leq 2^\circ$
  - $-2^\circ \leq \Delta \phi MI \leq 2^\circ$



### Ergebnisse

- Auch hier deutliche Reduktion der NO – Emissionen möglich
- Geringfügig verbesserte Partikelemissionen (PM)
- Vergleichbarer Drehmomentverlauf wie Standardparametrierung



## Resumee

In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Ansätze verfolgt, um die transient auftretenden Emissionsspitzen des PKW-Dieselmotors zu senken. Es wurden verschiedene Versuche unternommen die transient während des Gaspedalsprunges auftretenden Bedingungen zu gewissen Zeitpunkten (Momentaufnahmen) stationär nachzubilden um die gleichen Zylinderdruckverläufe und Abgaswerte zu erhalten. Unter Verwendung eines MPC wurde versucht das Motordrehmoment, die Zylinderfüllung und den Sauerstoffmassenstrom in den Motor zu regeln. Leider lassen sich die Zylinderdruckverläufe und die Abgasemissionen mit dieser Methode nicht zufriedenstellend rekonstruieren. Deshalb wurde ein Modellbildungsansatz für die transiente Emissionsänderung verfolgt. Es wurde der jeweils alleinige Einfluss von Änderungen der Einspritzparameter, konkret der Haupteinspritzmenge, des Haupteinspritzwinkels und Piloteinspritzwinkel, auf die Stickoxid- und Partikelemissionen und natürlich das Motordrehmoment untersucht. In einer Reihe von Messungen am Motorprüfstand wurden diese Abhängigkeiten der Ausgänge- von den Eingangsgrößen ermittelt. Basierend auf diesen Messungen wurden polynomiale Modelle für die einzelnen Zurechnungsparameter bestimmt. Auf Grundlage dieser Modelle wurde eine Optimierung (Offlineoptimierung) durchgeführt, welche den Schadstoffausstoß minimiert ohne den Drehmomentverlauf zu stark zu beeinflussen. Abschließend wurde eine Optimierung der Einspritzparameter durchgeführt, die sich nicht auf Modelle stützt und online am laufenden Motorenprüfstand alle drei Parameter optimiert. Die Kostenfunktion wird dabei direkt aus den Messwerten gebildet und benötigt keine mathematischen Modelle. Bei diesen Optimierungsarten wurden die Parameter mit Hilfe der Erkenntnisse aus der Identifikation der Modelle anschließend manuell feinjustiert um die Ergebnisse weiter zu verbessern. Beide Optimierungsvarianten beschäftigen sich im Gegensatz zur herkömmlichen Kalibrierung des Motorsteuergeräts mit transienten Vorgängen statt mit stationären Betriebspunkten. Aus dieser Arbeit lässt sich der Schluss ziehen, dass mit der vorhandenen, bereits in Serie eingesetzten Hardware und der im Einsatz befindlichen Luftfadregelung, nur durch gezielte Änderungen in der Einspritzstrategie bei transienten Vorgängen noch beträchtliche Emissionseinsparungen möglich sind.

