

# Masterarbeit

## Reduktion der transienten Rußemissionen eines Dieselmotors unter Verwendung eines schnellen Sensors

**Autor:** Florian Meier  
**Betreuer:** DI Patrick Schrangl  
 Univ.-Prof. DI Dr. Luigi del Re  
**Fertiggestellt:** August 2018

### Kurzfassung

Im Zuge der Einführung der Abgasnorm EURO 6 wurden die Schadstofflimits weiter abgesenkt, während die Anforderungen an das Fahrzeug durch den Umstieg auf den WLTC Testzyklus gesteigert wurden. Darüber hinaus müssen die gesetzlichen Grenzwerte durch die Einführung der Real Driving Emission (RDE) Tests auch im realen Straßenbetrieb eingehalten werden. Unter Zuhilfenahme moderner Messtechnik werden im Zuge dieser Arbeit Methoden entwickelt den transienten Rußausstoß von Dieselmotoren zu minimieren. Der neuartige Laser Induced Incandescence (LII)-Sensor ermöglicht durch seine schnelle Dynamik detailliertere Messungen der transienten Rußraten. Die Ergebnisse der dynamischen Rußmessungen können zur Erstellung eines Abgasmodells genutzt werden, welches in weiterer Folge zur Offline-Optimierung einer Stellgröße mit dem Ziel der Emissionsminimierung verwendet wird. Die Ergebnisse der Optimierung werden mittels additiven Raildruckeingriffen direkt über das Motorsteuergerät (ECU) vorgegeben. Dadurch können für ein gegebenes Szenario Reduktionen der Gesamtabgasemissionen gegenüber der standardmäßigen Motorsteuerung erzielt werden. Zwei verschiedene Regelkonzepte, eine vorhersagebasierte Vorsteuerung und eine Feedbackregelung, werden entwickelt und getestet. Besonders hohe Rußeinsparungen lassen sich durch die Verwendung eines Feedbackreglers erzielen, bei dem ein additiver Raildruckeingriff proportional zum gemessenen Rußsignal vorgegeben wird. Hierbei kann der schnelle LII-Sensor die Vorteile einer geringeren Totzeit sowie eines dynamischeren Ansprechverhaltens im Vergleich zu Serienmessgeräten wie dem Opazimeter nutzen, um höhere Rußeinsparungen zu realisieren. Durch Verwendung dieser echtzeitfähigen Regelmethode lassen sich Ergebnisse vergleichbar mit jenen der Offline-Optimierung erzielen.

### Offline-Optimierung

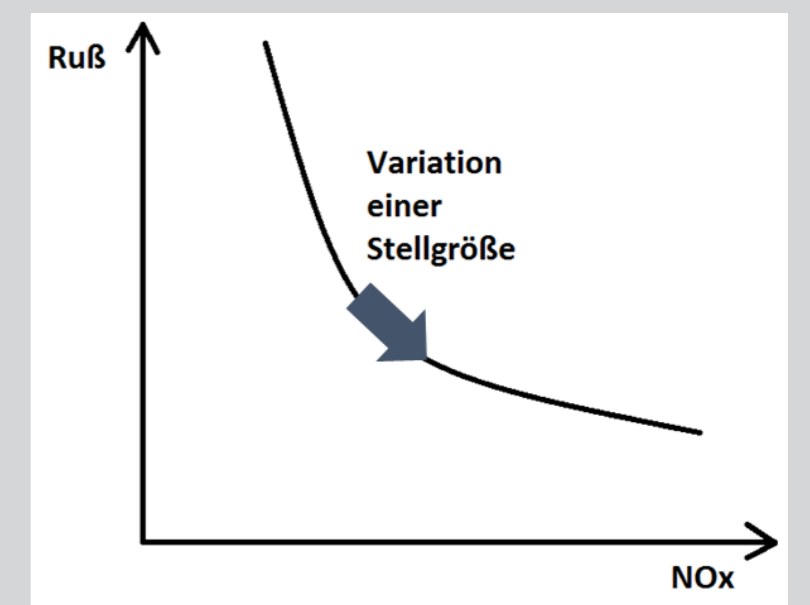
Die Best-Case-Optimierung dient zum Ausloten des theoretisch möglichen Emissionseinsparungspotentials bei Verwendung einer optimalen Raildruckvorgabe. Ruß- und Stickoxidemissionen sind über einen Tradeoff miteinander verknüpft. Deshalb ist es nicht möglich, eine Emissionsart unabhängig von der anderen zu minimieren, sondern es muss immer die gesamte Schadstoffbilanz berücksichtigt werden. Zur Berechnung der optimalen Eingangssequenz werden Modelle des Einflusses der Stellgröße auf die Ruß- und Stickoxidemissionen benötigt. Im Zuge der Modellbildung wird der Raildruck  $p_{Rail}$  entlang der ECU-Referenztrajektorie um konstante Offsets variiert. Da der Raildruck die Emissionentstehung nahezu instantan beeinflusst, können statische Modelle verwendet werden. Um die veränderliche Sensitivität zu berücksichtigen wird ein zeitvariantes Modell gewählt, in welchem die Zeit als Parameter der innermotorischen Bedingungen dient.

Die Minimierung einer Kostenfunktion, welche die gewichteten Ruß- und Stickoxidemissionen  $q_{Ru\beta}$  und  $q_{NO_x}$  beinhaltet, ergibt optimale Raildruckvorgaben in Abhängigkeit des Gewichtungsfaktors  $c$ .

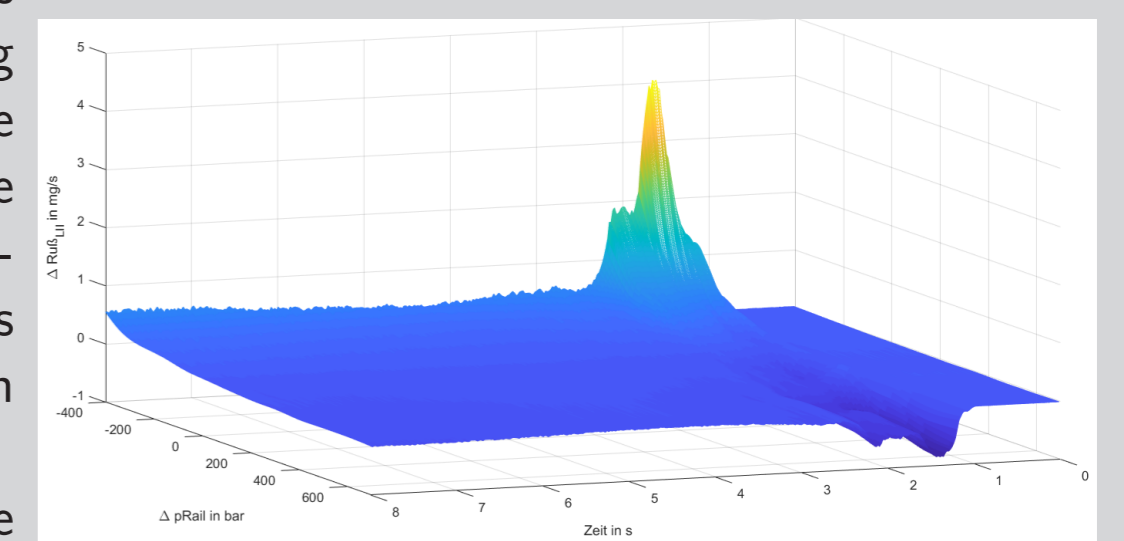
$$J(p_{Rail}(t)) = \int_0^{T_E} c \cdot q_{Ru\beta}(p_{Rail}(t), t) + q_{NO_x}(p_{Rail}(t), t) dt$$

$$p_{Rail,Opt}(t) = \arg \min_{p_{Rail}} J(p_{Rail}(t))$$

Je nach Wahl von  $c$  werden die Ruß- und Stickoxidemissionen unterschiedlich gewichtet und es ergeben sich dadurch unterschiedliche Lösungen.



Ruß-NOx-Tradeoff



Statisches zeitvariantes Rußmodell

### Vorsteuerung & Feedbackregelung

Mithilfe verschiedener Regelkonzepte soll das Potential der Offline-Optimierung auch in Echtzeit ausgeschöpft werden.

Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung einer schaltenden Vorsteuerung, welche basierend auf Prognosen über das folgende Rußniveau den Raildruck gegenüber der ECU Vorgabe anhebt. Der Vorhersagealgorithmus basiert rein auf Messwerten der Gaspedalposition sowie der Motordrehzahl und deren Änderungsraten. Werden hohe Rußraten prognostiziert, so wird die ECU Vorgabe um einen fixen Wert angehoben. Für niedrige Rußvorhersagen wird hingegen kein Eingriff durchgeführt. Die begrenzte Eingriffszeit sowie die starre Vorsteueramplitude des ursprünglichen Regelkonzepts beschränken das Einsparungspotential stark.

Bessere Ergebnisse werden mit einer Feedbackregelung erzielt, bei welcher der additive Raildruckeingriff proportional dem momentan Rußmesswert gestellt wird, folgend der Idee, dass hohe Rußraten durch hohen Raildruck gemindert werden können. Mittels Gain Scheduling lassen sich dabei für verschiedene Arbeitsbereiche unterschiedliche Verstärkungen einstellen. Durch Verwendung des empirisch getunten Reglers lassen sich, insbesondere in Kombination mit dem schnellen LII Sensor, vergleichbare Einsparungen erzielen wie bei Verwendung einer optimalen Stellgrößenvorgabe.

### Zusammenfassung und Ausblick

Durch Raildruckvariation lassen sich Rußeinsparungen erzielen, die jedoch zum Teil durch höhere NOx Emissionen erkauft werden müssen. Es können jedoch bei Verwendung einer Feedbackregelung bessere Ergebnisse erzielt werden als bei einer reinen Verschiebung der ECU Tradeoffkurve. Bemerkenswert ist, dass sich unter Verwendung des neuen LII Sensors größere Rußeinsparung realisieren lassen, als bei Verwendung eines langsameren Serienmessgerätes, trotz aller Schwächen des derzeitigen Prototyps. Eine Erweiterung auf zusätzliche Stellgrößen sollte nochmals bessere Ergebnisse erlauben, insbesondere auch eine Reduktion des Stickoxidausstoßes. Weitere Fortschritte und Entwicklungen sind nötig um die Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften unter allen Bedingungen auch in Zukunft garantieren zu können. Eine emissionsbasierte Feedbackregelung ist hierfür ein vielversprechender Ansatz.

### Ergebnisse

In den untenstehenden Grafiken werden die Ergebnisse bei Verwendung der Feedbackregelung in Kombination mit dem LII mit der Performance der ECU verglichen. Als Testzyklus dient ein Ausschnitt des Worldwide Harmonized Light Duty Test Cycles (WLTC). Alle verwendeten Rußmessgeräte (LII, Opazimeter und Micro Soot Sensor) detektieren eine starke Reduktion der Rußraten im Vergleich zur ECU. Die Eigenschaften der einzelnen Messgeräte werden in diesem Vergleich deutlich, insbesondere das starke Rauschen des LIIs und das träge Ansprechverhalten des Micro Soot Sensors. Der gemessene Stickoxidausstoß steigt leicht an. Der erhöhte Raildruck führt zu einer besseren Zerstäubung des eingespritzten Kraftstoffs, somit zu einer besseren Verteilung im Brennraum und in weiterer Folge zu einer schnelleren und somit heißeren Verbrennung. Die hohen Temperaturen sind für den Anstieg des NOx Ausstoßes verantwortlich.

In der rechten Grafik werden die integralen Abweichungen der Ruß- und Stickoxidemissionen gegenüber der ECU Referenz für verschiedene Regelungen verglichen. Die besten Ergebnisse, d.h. die größten Einsparungen können mit einer optimalen Stellgrößenvorgabe (grün x) aus der Offline-Optimierung erzielt werden. Im Vergleich dazu, bewirken konstanten Offsets (schwarz o) additiv zur ECU Vorgabe nur eine Verschiebung entlang der Tradeoffkurve ohne tatsächliche Einsparungen. Die Feedbackregelung verwendet entweder den schnellen LII Sensor (rot +) oder das etwas langsamere Serienmessgerät Opazimeter (blau \*) zur Berechnung des Feedbacksignals. Dabei wird ersichtlich, dass sich durch die Verwendung des LIIs nochmals rund 5% Ruß einsparen lassen, im Vergleich zur Verwendung des Opazimeters. Dies ist vermutlich der schnelleren Ansprechzeit des LIIs geschuldet.

Insgesamt lassen sich mit dieser Methode rund 50% bis 60% Ruß einsparen auf Kosten von ca. 7% höherem NOx Ausstoß im Vergleich zur standardmäßigen ECU Kalibrierung.

