

# Masterarbeit

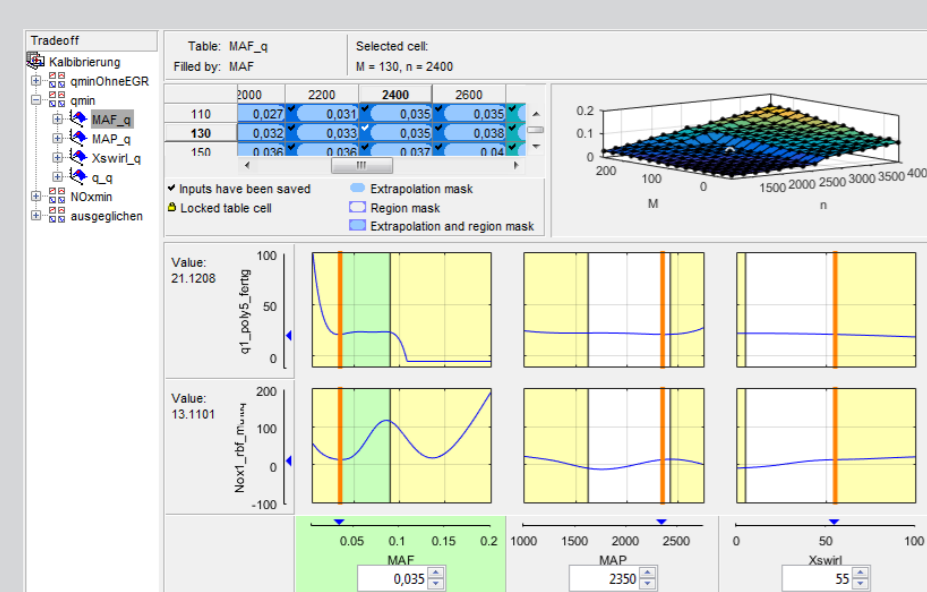
## Entwicklung einer schaltenden Strategie zur Einhaltung von Emissionsgrenzwerten bei unbekanntem Fahrzyklen

**Autor:** Robert Ebner  
**Betreuer:** Univ.Prof. Dr. Luigi del Re  
 Dr. Harald Waschl  
 DI Philipp Polteraer  
**Fertiggestellt:** Juli 2016

### Kurzfassung

Bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen fallen immer Emissionen an, welche dem Menschen und der Umwelt schaden. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass durch richtiges Umschalten zwischen einer treibstoffsparenden und einer NO<sub>x</sub>-sparenden Motorkalibrierung ein effizienterer Betrieb als mit einer Standardkalibrierung möglich ist. Im ersten Schritt wurden diese drei Kalibrierungen, basierend auf einem Mittelwertmodell des Motors, erstellt. Dazu mussten statische Modelle für die Einspritzmenge und die NO<sub>x</sub>-Emissionen identifiziert und für jede Kalibrierung ein Kompromiss zwischen den Emissionen gefunden werden. Anschließend ist eine Simulationsumgebung aufgebaut worden, an welcher verschiedene kausale und prädiktive Schaltstrategien entworfen wurden. Da ein schnelles Umschalten zwischen den statischen Kalibrierungen keinen Sinn ergab, lag jede Schaltstellung für mindestens 5 Sekunden an. Zum Abschluss der Arbeit wurden die Ergebnisse aus der Simulation noch durch Messungen am Motorprüfstand plausibilisiert.

### Kalibrierung



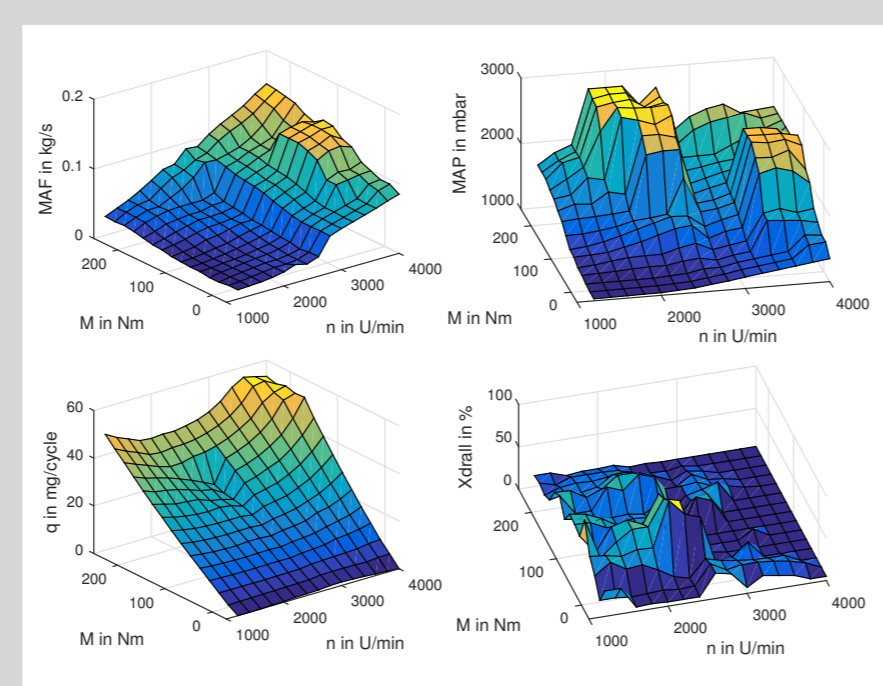
Um Sollgrößen für die Motorregelung zu erhalten wurden eine treibstoffsparende, eine NO<sub>x</sub>-sparende und eine ausgeglichene Kalibrierung generiert. Dafür stellt Matlab® mit der Model-Based Calibration Toolbox™ ein hilfreiches Werkzeug zur Verfügung.

Zuerst wurden mit einem DOE statische Modelle für die Einspritzmenge und das NO<sub>x</sub> identifiziert. Anschließend konnten damit die Kalibrierungen erstellt werden. Dieser Vorgang ist im linken Bild

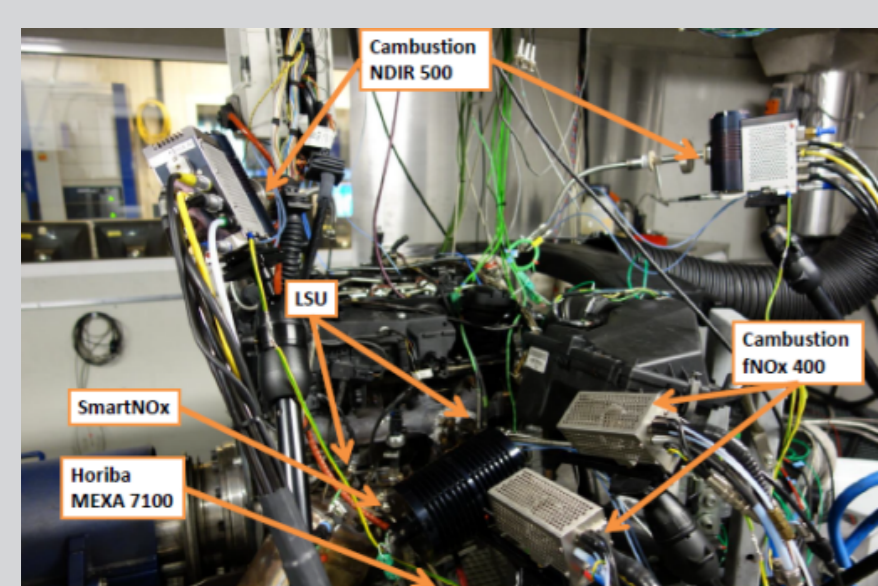
ersichtlich. Der hauptsächliche Unterschied zwischen den Kalibrierungen ist, dass die NO<sub>x</sub>-Sparende einen höheren Ladedruck als die Treibstoffsparende vorgibt.

Bei gleichbleibender Frischluftmasse führt das zu einer höheren Abgasrückführung und dies wiederum zu einer NO<sub>x</sub>-Reduktion. Ab einer Drehzahl von 2800 U/min darf aus thermischen Gründen kein Abgas mehr zurückgeführt werden. Dies zeigt sich durch die Stufe in MAF-Kennfeld, welche in der rechts abgebildeten, ausgeglichenen Kalibrierung zu erkennen ist.

Die fertigen Kalibrierungen lassen sich als m-File aus der Toolbox exportieren und können dadurch leicht für die Simulation initialisiert werden.



### Messungen am Prüfstand

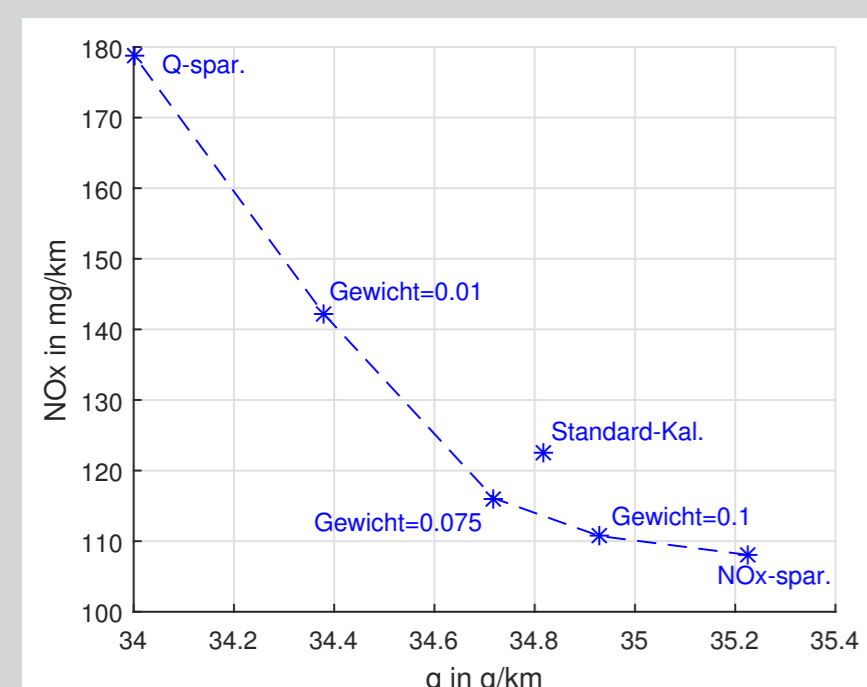


Zur Bestätigung der Simulationsergebnisse wurden am Motorprüfstand Messungen durchgeführt, bei denen ebenfalls zwischen zwei Kalibrierungen umgeschaltet wurde. Der Prüfstand mit den für die Emissionsmessung relevanten Sensoren ist im oberen Bild dargestellt. Da die NO<sub>x</sub>-Emissionen in ppm gemessen werden, mussten diese noch über die Abgaszusammensetzung in g/km umgerechnet werden.

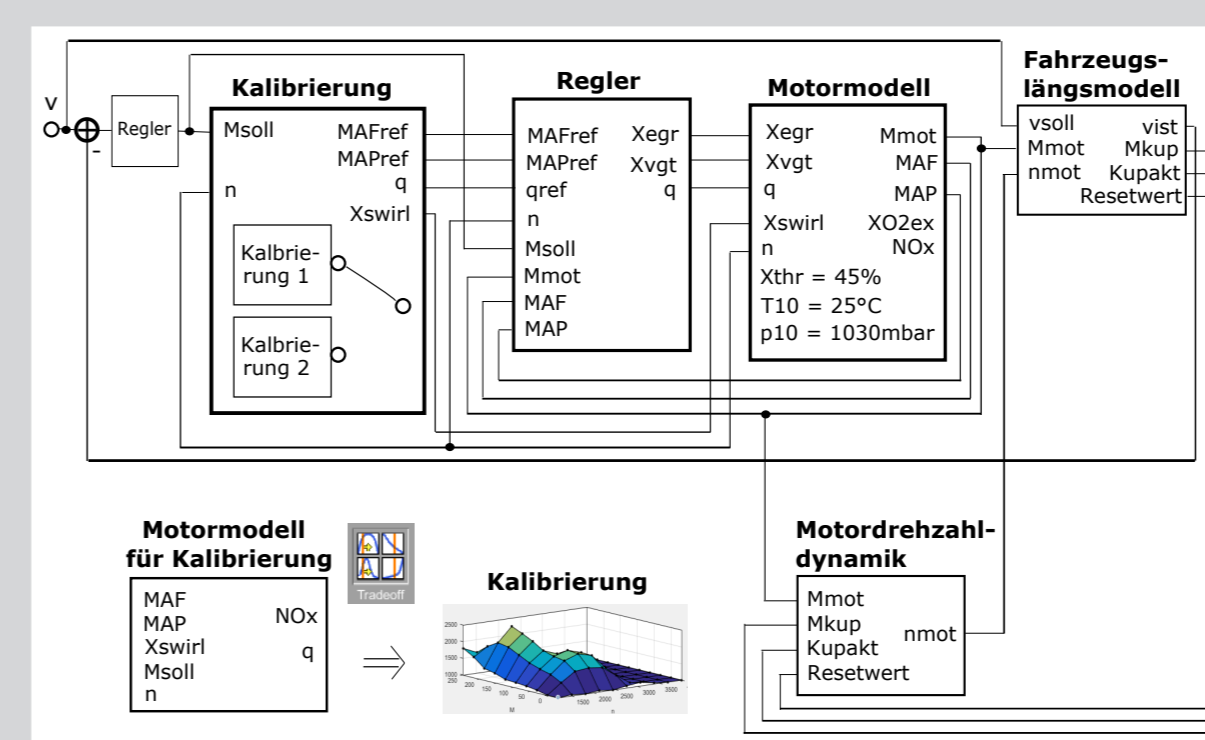
Um das Umschalten zu realisieren, war es notwendig die aktuellen Sollwerte über dSPACE und den ECU-Bypass vorzugeben. Die Messungen wurden an der ersten Phase des FTP-75 Zyklus durchgeführt, um eine möglichst kurze und dennoch dynamische Fahrt zu untersuchen.

Aus den treibstoff- und NO<sub>x</sub>-sparenden Messungen wurde mit dem Optimierungsalgorithmus aus der Simulation, ein Schaltvektor generiert. Die Ergebnisse für verschiedene Gewichtungsfaktoren sind im unteren Bild eingetragen.

Es ergibt sich eine Pareto-Kurve, welche die bestmöglichen Lösungen für eine Schaltstrategie widerspiegelt. Diese Kurve liegt eindeutig unter dem Punkt der Standardkalibrierung. Somit wurde belegt, dass durch ein passendes Umschalten zwischen zwei Kalibrierungen ein Einsparungspotential vorhanden ist. Außerdem untermauert dieses Ergebnis die Aussagen aus der Simulation.



### Simulationsstudie

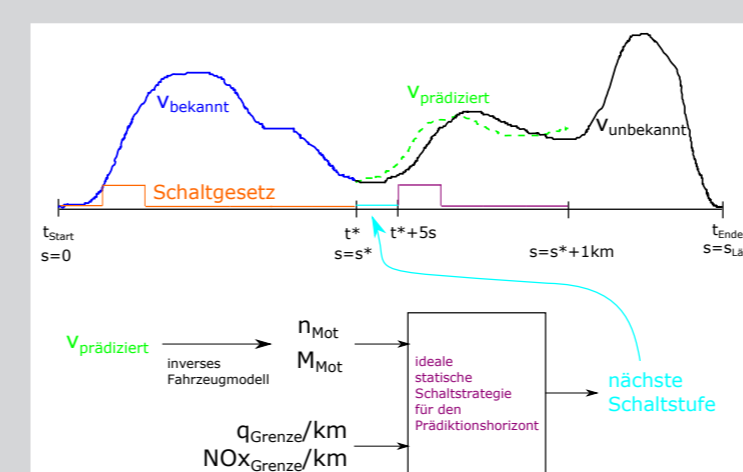
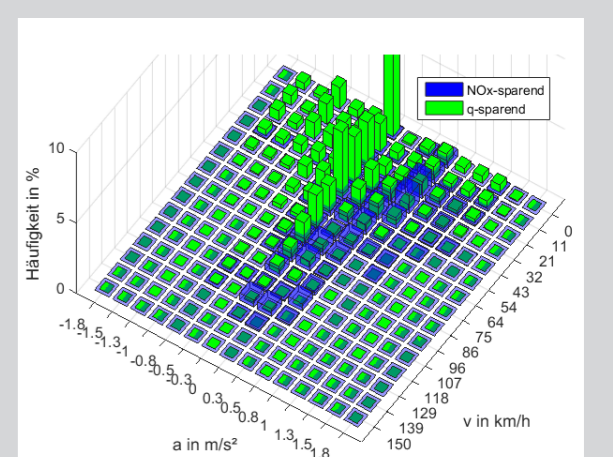


Für die Erstellung verschiedener Schaltstrategien wurde zuerst eine Simulationsumgebung in Simulink® erstellt. Diese basiert auf einem bereits vorhandenen Mittelwertmodell des Motors und einem virtuellen NO<sub>x</sub>-Sensor. Das linke Bild zeigt eine Prinzipskizze von allen für die Simulation benötigten Teilsystemen. Zunächst wurden Simulationen von den genormten Fahrzyklen durchgeführt. Dabei sind die Einspritzmengen  $q$  und das NO<sub>x</sub>, je einmal mit der treibstoffsparenden und ein andermal mit der NO<sub>x</sub>-sparenden Kalibrierung aufgenommen worden. Aus diesen Daten wurde mit dem folgenden Optimierungsproblem ein idealer Schaltvektor zur Auswahl der Kalibrierung erstellt:

$$\arg \min_{\vec{x} \in \{0,1\}} \left[ (1 - \mu) \frac{\vec{q}_{q-opt}^T (!\vec{x}) + \vec{q}_{NOx-opt}^T \vec{x}}{q_{Norm}} + \mu \frac{NOx_{q-opt}^T (!\vec{x}) + NOx_{NOx-opt}^T \vec{x}}{NOx_{Norm}} \right]$$

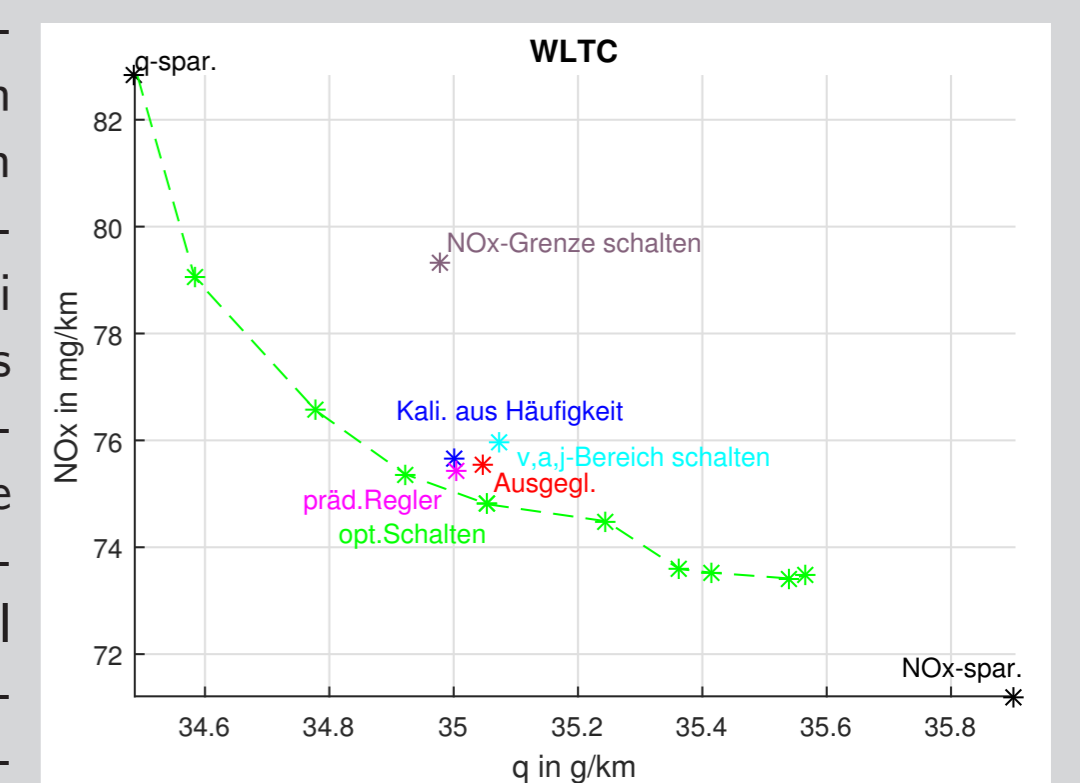
$$\text{s.t.} \left[ \begin{matrix} \vec{Q}_{i,q-opt} \\ \vec{NOx}_{i,q-opt} \end{matrix} \right] (!\vec{x}) + \left[ \begin{matrix} \vec{Q}_{i,NOx-opt} \\ \vec{NOx}_{i,NOx-opt} \end{matrix} \right] \vec{x} \leq \left[ \begin{matrix} Q_{ges,max} \\ NOx_{ges,max} \end{matrix} \right]$$

Aus den optimalen Schaltvektoren der genormten Zyklen, konnte eine Häufigkeitsverteilung der Schaltstellungen bestimmt werden. Diese kann über der Lastanforderung oder der Geschwindigkeit  $v$ , der Beschleunigung  $a$  und dem Ruck  $j$  aufgetragen werden. Im ersten Fall ergab sich eine neue Kalibrierung und im Zweiten eine Umschaltung nach dem  $v, a, j$ -Bereich. Anschließend wurden diese Strategien an realen Fahrzyklen validiert. Zusätzlich ist noch das Umschalten an einem NO<sub>x</sub>-Grenzwert untersucht worden.

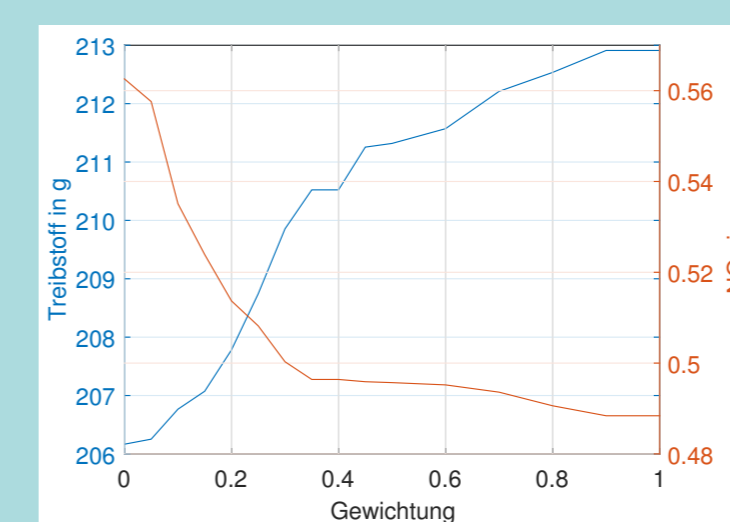


Um möglichst viel der zur Verfügung stehenden Information zu nutzen, wurde anschließend ein prädiktiver Regler entworfen. Die Funktionsweise dieses Reglers ist in der linken Abbildung dargestellt. Der Regler berechnet aus einer prognostizierten Geschwindigkeit eine Lastanforderung und aus dieser, mit den statischen Kalibrierungswerten, die  $q$  & NO<sub>x</sub>-Vektoren für das oben angesprochene Optimierungsproblem.

Die resultierenden Ergebnisse sind hier beispielhaft am WLTC Zyklus dargestellt. Man erkennt, dass der prädiktive Regler die besten Ergebnisse erzielt und dabei auch die Einhaltung eines NO<sub>x</sub>-Grenzwerts sicherstellt. Bei den kausalen Strategien schneiden beide aus der Häufigkeitsverteilung generierten Schaltverfahren gut ab. Die grüne Linie ist eine Pareto-Kurve mit den statisch optimal bestimmten Schaltzeitpunkten. Auf jeden Fall wurde gezeigt, dass ein Einsparungspotential durch das Umschalten zwischen zwei Kalibrierungen besteht.



### Zusammenfassung und Ausblick



In der Simulation wurde gezeigt, dass durch richtiges Umschalten zwischen zwei Kalibrierungen Schadstoffe eingespart werden können. Dieses Ergebnis ist anschließend durch Messungen am Prüfstand bestätigt worden. Die resultierende Emissionseinsparung ist zwar eher gering, wirkt sich jedoch durch die hohe Anzahl der neu zugelassenen Diesel-PKW nennenswert auf den Treibstoffverbrauch und die NO<sub>x</sub>-Emissionen aus. Die besten Resultate erzielt der prädiktive Regler, wobei sich Prädiktionsfehler stark auswirken können. Das Umschalten nach dem  $v, a, j$ -Bereich erzielt die zweit besten Ergebnisse, kann jedoch die Einhaltung eines NO<sub>x</sub>-Grenzwerts nicht garantieren. Die Kalibrierung aus den Häufigkeiten hält einen NO<sub>x</sub>-Grenzwert ein und liegt nahezu gleichauf. Da sich nicht nur der Motor sondern auch das Fahrzeug auf die Emissionentstehung auswirkt, wären Messungen am realen Fahrzeug eine interessante Erweiterung. Außerdem könnte in weiterführenden Untersuchungen eine dynamische Sollwertvorgabe für die Motorregelung betrachtet werden.