



Doctoral Thesis

Geregelte Abgasrückführung zur Senkung der Stickoxid- und Partikelemissionen beim Dieselmotor mit Comprex-Aufladung

Author(s):

Amstutz, Alois

Publication Date:

1991

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000599595> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH Nr. 9421

**Geregelte Abgasrückführung zur
Senkung der Stickoxid- und
Partikelemissionen beim
Dieselmotor mit
Comprex-Aufladung**

ABHANDLUNG

Zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

ALOIS AMSTUTZ

Dipl. Maschineningenieur ETH

geboren am 9. Februar 1958

von Engelberg/OW und Stans/NW

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. M. K. Eberle, Referent

Prof. Dr. A. H. Glattfelder, Korreferent

1991

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Senkung der Stickoxid- und Partikelemissionen bei einem indirekt eingespritzten Pkw-Dieselmotor mit Druckwellenaufladung. Ohne Nachteile im Verbrauch können mittels der geregelten Abgasrückführung die Stickoxid- und die Partikelemissionen im FTP 75 Stadtzyklus um 50 bzw. 30 % gesenkt werden.

Inhaltlich werden drei Schwergewichte behandelt:

- Der Aufbau des Systems für die geregelte Abgasrückführung
- Die Modellierung der Regelstrecke und der Reglerentwurf
- Die Erprobung der geregelten Abgasrückführung in Stationärversuchen und in Zyklusmessungen

Systemaufbau

Im Rotor des Druckwellenladers Comprex treffen Rauchgas und Luft aufeinander. Die Idee liegt nahe, in bestimmten Betriebsbereichen des Motors einen definierten Anteil Abgas zur Verminderung der Stickoxidemissionen der Ladeluft beizumischen. Mit einer Drosselklappe auf der Luftniederdruckseite lässt sich die Trennfront zwischen Luft und Abgas im Rotor des Druckwellenladers so gegen die Luftseite hin verschieben, dass ein Teil des Abgases in die Ladeluft strömt.

Die Luftüberschusszahl λ , die sich mit der von Ottomotoren her bekannten λ -Sonde messen lässt, gibt auch im Dieselmotor jederzeit hinreichend Aufschluss über den Sauerstoffgehalt des Rauchgases und bestimmt über die Regelung das Mass der rückzuführenden Abgasmenge. Da die Funktionsweise der Sauerstoffmessung vom Druck abhängt, muss die λ -Sonde im niederdruckseitigen Abgasstrom montiert werden. Daraus erwächst der Nachteil, dass eine Änderung der rückgeführten Abgasmenge wegen der "langen" Distanz zwischen Drosselklappe und λ -Sonde verzögert festgestellt wird. Das gegenüber dem Ottomotor tiefere Temperaturniveau im Dieselmotor vergrößert zudem im Bereich kleiner Lasten die Zeitkonstante der λ -Sonde und macht den Messvorgang langsam.

Für seinen hochdynamischen Betrieb im Fahrzeug braucht der Dieselmotor bei plötzlichen Beschleunigungen sofort Luft, wenn Fahrverhalten und HC-, CO- und Partikelemissionen akzeptabel bleiben sollen. Demzufolge muss die Regelung der rückgeführten Abgasmenge ausserordentlich schnell sein.

Reglerentwurf

Das Regelkonzept auf der Basis des Smithprädiktors, mit einer vollständigen Vorhersage des Systemverhaltens um die Dauer einer Totzeit, scheitert, weil die Änderung der Luftüberschusszahl nicht in jedem Fall eindeutig einer Änderung der Drosselklappenstellung zugeordnet werden kann. Aufgrund der hohen Eigenfrequenzen des für die totzeitfreie Strecke ausgelegten Reglers beginnt der Regelkreis in Betriebsbereichen, wo die Vorhersage des Systemverhaltens schlecht ist, zu schwingen und beeinträchtigt sowohl Fahrverhalten wie Emissionen stark.

Sehr gut lässt sich die Regelaufgabe mit einem Zustandsregler lösen. In der Wirkung ähnlich einer Vorsteuerung, wird in einem ersten totzeitfreien Regelkreis der Luftmassenstrom mit Hilfe eines analytischen Regelstreckenmodells beobachtet und geregelt. Ein zweiter Regler kompensiert den "Steuerfehler" und führt den λ -Messwert mit einer systemtypischen Zeitkonstante dem Sollwert nach. Die angewandte LQG/LTR-Methode (Linear-Quadratic-Gaussian / Loop-transfer-recovery Method) bewährt sich in der praktischen Anwendung zur Auslegung eines robusten Reglers.

Der Sollwert für die Luftüberschusszahl λ ist beliebig wählbar, in Beschleunigungsphasen wird er von der Gaspedalstellung gesteuert. Um bei der Echtzeitregelung die Rechenzeiten im μ -Prozessor klein zu halten, ist das Beobachtermodell ausschliesslich auf analytischen Gleichungen aufgebaut. Reglerentwurf wie Reglerimplementation sind Inhalt der Arbeit.

Messergebnisse

Die Testläufe mit der geregelten Abgasrückführung im FTP 75 Testzyklus führen zu sehr guten Ergebnissen. Bei einer geringen Zunahme des HC- und CO-Ausstosses lassen sich mit der optimalen Sollwerteinstellung $\lambda = 2$ in den Stickoxid- und Partikelemissionen bezüglich der Grenzwerte US 83/87 Verbesserun-

gen von 50 bzw. 30 % erreichen. Die Regelung macht die Abgasrückführung als Mittel zur Senkung der Stickoxidemissionen in Pkw-Dieselmotoren nutzbar, weil damit im Gegensatz zur Steuerung die negativen Nebeneffekte beherrscht oder im Fall der Partikelemissionen sogar in Vorteile umgewandelt werden können.

Die Regelstrategie zielt darauf hin, in starken Beschleunigungen dem Motor die volle Luftmenge zur Verfügung zu stellen, in jeder anderen Situation massvoll Abgas rückzuführen. Dadurch entstehen im geregelten System in den Beschleunigungsphasen gegenüber dem Motor ohne Abgasrückführung keine zusätzlichen Partikel-, HC- und CO-Emissionen; Im Normalbetrieb hingegen sind die Bedingungen für eine Nachoxidation der Russteilchen wegen der höheren Abgastemperaturen besser.

Abstract

The increasing importance of environmental protection requires a drastic reduction of NO_x- and particulates-emissions of diesel engines. This has motivated the development of the present exhaust gas recirculation system with a feedback control, implemented on a Compres pressure wave supercharged IDI diesel engine.

The work consists of three parts:

- the configuration of the plant and the use of an oxygen sensor in a diesel engine
- the design of the feedback control system
- the test configuration, the experimental work and the results

In the rotor of the pressure wave supercharger, there exists a direct contact between air and exhaust gas. By throttling the suction intake of the Compres, it is possible to influence the pressure wave process and to force an intrinsic exhaust gas recirculation (EGR). The air/fuel ratio, measured by an oxygen sensor in the exhaust, is a representative parameter of the engine's actual operating state. Its signal can be used to proportion the correct rate of exhaust gas to the charge air. The implementation of the oxygen sensor in the diesel engine and its dynamic behaviour, depending on exhaust gas temperature, have been investigated within this work.

The feedback control utilizes a mathematical model of the process. This model is affected by a number of uncertainties coming from a time delay between input and output of the controlled system, the flow characteristic of the throttle valve and the dynamic behaviour of the oxygen sensor. Due to the control system design method used here, namely the LQG/LTR method (linear quadratic Gaussian/loop transfer recovery method), the closed loop control achieves asymptotic stability and good phase and gain margins. During an acceleration, the reference input of the controller depends on the time derivative of the accelerator position, in order to guarantee a sufficient oxygen supply in every situation and to avoid the disturbance of the engine transient behaviour by EGR.

The influence of feedback controlled EGR on emissions and fuel consumption is investigated on a stationary testbench, as well as during the FTP cycle. Feedback control makes the EGR a powerful method of reducing the NO_x-emissions. The results demonstrate a substantial NO_x-reduction of 42 %, as well as 20 % less particulates in the FTP cycle, with no penalties in fuel consumption. In comparison to the engine without EGR, the HC- and CO-emissions remain the same.

The remarkable simultaneous reduction of both NO_x and particulates is an important achievement and can be understood in the context of optimal oxygen availability for the relevant chemical processes. Decreasing O₂ will significantly decrease NO_x. This, however, will not affect soot oxidation negatively, unless the O₂ concentration reaches a lower limit, from which on soot oxidation kinetics becomes dominant. For the present engine configuration this limit appears to correspond to an equivalence ratio of 0.5. Furthermore, slightly higher exhaust temperatures resulting through EGR will tend to favour soot oxidation. Clearly, it is possible to reduce both NO_x and particulates, if the stoichiometry can be kept within the optimal range by means of an EGR feedback control like the one implemented in the present work.