Diss. ETH ex. B

Diss. ETH Nr. 11672

Entwurf und Optimierung der Fahrstrategien für ein Personenwagen-Antriebskonzept mit Schwungrad-komponente und stufenlosem Zweibereichsgetriebe

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

CHRISTIAN GEORG WITTMER

Dipl. Masch.-Ing. ETH
geboren am 5. Februar 1964
von Niedererlinsbach SO

ETH BIBLIOTHEK ZÜRICH
CatE

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. M.K. Eberle, Referent
Prof. Dr. A. Kündig, Korreferent
Prof. Dr. L. Guzzella, Korreferent

1996

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Entwurf und der Optimierung - bezüglich minimalen Verbrauchs - der vollständigen, den gesamten Betriebsbereich des Fahrzeugs abdeckenden Fahrstrategien für das neuartige Antriebskonzept des Hybrid III mit einem Schwungrad als Kurzzeitenergiespeicher und einem stufenlosem Zweibereichsgetriebe.

Ausgehend vom bestehenden Konzept werden die verschiedenen Betriebsarten und Kombinationsmöglichkeiten der beiden Antriebsmotoren (Verbrennungs- und Elektromotor) und des Schwungrades untersucht und ihre spezifischen Vorteile aufgezeigt. Aufgrund dieser Untersuchung werden die Fahrstrategien definiert, die dann mit Hilfe der Spezifikationsmethode CIP (Communicating Interacting Processes) formal beschrieben werden (die CIP-Spezifikationsmethode und das zugehörige CASE-Tool wurden am Institut für Technische Informatik und Kommunikationsnetze der ETH Zürich entwickelt).

Mit Hilfe von Simulationsrechnungen werden die Fahrstrategien unter Berücksichtigung der physikalischen Machbarkeit und der Fahrbarkeit im gesamten Fahrbereich ausgetestet. Diese Simulationen erlauben ein Austesten (und später auch eine Optimierung) der Fahrstrategien vor der eigentlichen Implementation auf dem Prüfstand oder im Fahrzeug. Dazu wird der gesamte Antrieb in Form eines nichtlinearen dynamischen Modells beschrieben. Im Fahrzeugmodell enthalten sind alle möglichen Systemkonfigurationen, so dass auch die Uebergänge zwischen den verschiedenen Betriebsarten und Fahrstrategien simuliert und ausgetestet werden können. Für die Verifizierung der Fahrstrategien werden die vom CIP-Tool automatisch generierten C-Module (Programmiersprache ANSI C) mit dem Simulationsmodell gekoppelt. Die auf diese Art verifizierten C-Module werden bei der späteren Implementation des Steuerungssystems verwendet. Die Verifizierung geschieht sowohl anhand von Simulationen mit manueller Eingabe der Fahrerwünsche als auch mit Hilfe von Fahrzyklusrechnungen, bei denen ein Fahrregler die Eingaben für den Kraftwunsch am Rad übernimmt.

Für die Optimierung der Fahrstrategien in bezug auf minimalen Brennstoffverbrauch wird das Fahrzeugmodell mit Verbrauchs-, Verlust- und

Wirkungsgradmodellen der Antriebskomponenten erweitert. Diese basieren teilweise auf Prüfstandsmessungen und Herstellerangaben, oder auf physikalischen Modellen. Die Parameteroptimierung selbst wird einerseits mit einer aufwendigen numerischen Methode, andererseits mit einer auf Approximationen und Vereinfachungen gestützten semi-analytischen Methode durchgeführt. Dabei wird von einem quasi-stationären Ansatz ausgegangen, d.h. es werden Fälle mit konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit, aber unterschiedlichen Lastmomenten optimiert. Mit der Betrachtung des transienten Fahrbetriebs als Abfolge von Abschnitten mit konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit können diese Optimierungsresultate auf die allgemeinen Fahrstrategien übertragen werden. Die Zulässigkeit dieser Betrachtungsweise wird anhand von Fahrzyklusrechnungen verifiziert. Der Vergleich mit den nicht optimierten Fahrstrategien im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) zeigt eine entsprechende Verbrauchsverbesserung.

Die Verbrauchsresultate der Fahrzyklusrechnungen werden mit den Angaben eines heutigen VW Golf III mit ähnlicher Motorleistung verglichen. Tab. 0.1 zeigt als Resultat den Brennstoffverbrauch im ECE-R15-Stadtzyklus für den Hybrid III (mit fast 350 kg Mehrgewicht) mit einer verbrauchsoptimierten und einer den gesamten Drehzahlbereich ausnutzenden Fahrstrategie im Vergleich zum Golf III.

	VW Golf III 1.6 l	Hybrid III mit Drehzahlbereich ausnutzender Fahrstrategie	Hybrid III mit verbrauchsoptimierter Fahrstrategie
Verbrauch im ECE-R15-Zyklus [l/100km]	8.9	6.2	4.5

Tab. 0.1: Vergleich Brennstoffverbrauch

Die Funktionstüchtigkeit der Steuerung wird an einem Teilsystemprüfstand ausgetestet. Dieser Prüfstand dient der Brennstoffverbrauchsmessung im sogenannten Taktbetrieb unter realistischen Bedingungen. Diese Messungen bestätigen die Optimierungsresultate im Taktbetrieb.

Eine Sensitivitätsanalyse am Schluss dieser Arbeit zeigt die Auswirkungen der verschiedenen Modellparameter auf die Optimierungsresultate. Dies

erlaubt eine effiziente Bewertung von allfälligen Abweichungen zwischen zukünftigen Messungen und Simulationsrechnungen.

In Zusammenarbeit mit der Volkswagen AG, Wolfsburg - die auch in verdankenswerter Weise die Fertigung des Getriebes übernahm - ist der Einbau des gesamten Antriebsstranges in ein Fahrzeug (inkl. Steuerungssoft- und Hardware) geplant. Die Erfahrungen mit diesem Fahrzeug werden schliesslich zu einer endgültigen Aussage über das Verhalten des Hybrid III-Antriebes führen.

Summary

This work contains the design and the optimization of the control strategies for the novel drive train concept of the ETH Hybrid III. The concept includes a flywheel as a short time energy storage device and a continuously variable transmission with a wide gear range (i^2 - CVT).

In a first step, the various possibilities of combining the drive train components within different operating modes are discussed. Based upon this analysis, the control strategies are defined. For the formal description of the chosen control strategies, the specification method CIP (Communicating Interacting Processes) is used. (The CIP method and the corresponding CASE tool have been developed at the Computer Engineering and Network Laboratory of the Swiss Federal Institute of Technology (ETH) in Zurich.)

Considering physical constraints and driveability issues the control strategies are verified with model-based simulations. With this approach, the control strategies are tested (and later optimized) before the implementation of the control system on a test bench or in a vehicle. In the model, the components of the drive train are described as non-linear dynamical systems. This model includes all possible system configurations, i.e., the transitions between different operating modes and strategies can be simulated as well. For the verification of the control strategies, the source code of the controller (generated by the CIP tool) is coupled with the simulation model. The same (verified) source code can be used for the implementation of the control system. In order to simulate entire test cycles, e.g., the new European drive cycle (NEFZ), the driver is modeled as a speed controller.

For the optimization of the control strategies with regard to minimal fuel consumption, the drive train model has been extended to include various submodels (consumption, friction losses, etc.). These additions have been derived from measurements, manufacturer's specifications, as well as from physical laws. The parameters are optimized with a purely numerical method that uses the full model, and a semi-analytical method based on several model-approximations and simplifications. Constant vehicle speeds are assumed in each optimization case. The results of this step are translated to the transient driving conditions by simplifying these patterns as sectionally

constant. The validity of this approach is verified with simulations of entire test-cycles. The comparison with the non-optimized control strategies in the NEFZ-cycle shows a corresponding improvement of the fuel economy.

The results of these simulations are compared with a VW Golf III with similar engine power. Table 0.1e shows the fuel consumption of the Golf and the Hybrid III in the ECE-R15 city cycle. The Hybrid III (with an additional weight of 350 kg) has been simulated using two different strategies: The first strategy takes advantage of the full speed range of the flywheel, the second one uses the proposed optimized strategy to minimize fuel consumption.

	VW Golf III 1.6 l	Hybrid III using full flywheel speed range	Hybrid III with optimized fuel consumption
Fuel consumption ECE-R15-cycle [l/100km]	8.9	6.2	4.5

Table 0.1e: Comparison of fuel consumption

A part of the control system has been verified on a test bench by sampling the specific fuel consumption of the so called duty cycle mode at real conditions. These measurements fully confirm the results of the parameter optimization.

Finally, a sensitivity analysis shows the influence of each model parameter on the optimization results. This allows an efficient interpretation of possible deviations between future measurements and the corresponding calculations.

The integration of the complete drive train into a vehicle, including all control soft- and hardware, is planned in cooperation with the German Volkswagen AG in Wolfsburg. The tests performed with the mentioned vehicle will yield the final performance assessment of the Hybrid III concept.