

Diss. ETH No. 20706

System Design of a Directly Air Assisted Turbocharged SI Engine Using a Camshaft Driven Valve

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

Christoph Voser

MSc ETH ME
born October 22, 1982
citizen of Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Lino Guzzella, examiner
Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister, co-examiner
Dr. Christopher H. Onder, co-examiner

2012

Abstract

The pneumatic hybridization in combination with downsizing and turbocharging is a promising approach to reduce the fuel consumption of spark-ignited (SI) engines while maintaining an excellent driveability. The associated system costs are substantially smaller than those of the well-known electric hybridization.

Hybrid pneumatic engines (HPEs) are equipped with an additional “charge” valve (CV) per cylinder that connects the cylinder to an air pressure tank. The compressed air is used to start the engine. The so-called pneumatic engine start is fast enough to justify the elimination of engine idling and the use of a stop/start functionality. Furthermore, the injection of compressed air into the combustion chamber during the compression phase can recover the driveability. This so-called boost mode is the enabler of strong downsizing and turbocharging.

Thus far, fully variable camless valve-trains have been investigated for the charge valve actuation. These systems are expensive, complex and are not available in series production, which prevented a breakthrough of the HPE technology. This thesis evaluates whether and how camshaft driven systems currently available can be used to control the air exchange. Such systems are simpler and more cost-effective, which makes them more attractive for a realization. The reduced complexity and cost of the valve-train come at a loss of variability which can be overcome by control strategies. Hence, the design of the valve-train system of the charge valve becomes crucial.

First, all pneumatic engine modes available on a directly connected HPE are analyzed with respect to their fuel saving potential, required valve-train variability and air demand. As a result, propelling the vehicle with air is omitted. Thus, the HPE boils down to a turbocharged (TC) SI engine, which uses pressurized air for the engine start and to boost the engine. The tank can still be filled by running the engine as a compressor during deceleration phases. The resulting system is called directly air-assisted TC SI engine. Its fuel saving potential for a downsizing factor of two amounts to 28%, which is only slightly smaller than the 31% achievable with a fully variable valve-train.

The air exchange between the cylinder and the tank depends on the lift profile, the valve diameter and the tank pressure. The lift profile is characterized by its opening instant, closing instant, acceleration and maximum lift. For each mode a design methodology is derived to find an appropriate valve lift profile while respecting the influence of the valve diameter, the tank pressure and other constraints. The methodologies are generic and can be applied to arbitrary engines. All design methodologies are exemplarily applied to the 0.75 l two-cylinder TC SI test bench engine available at the institute.

Since the boost mode is used to improve the driveability of TC SI engines its valve design is linked to a performance criterion. Furthermore, the boost mode with camshaft driven CVs ideally complements the use of a conventional turbocharger. At low engine speeds, the effect of the boost mode is largest. Thus, it compensates the turbo lag, which is most prominent at low engine speeds. Additionally, the torque control is complicated by the limited variability of the mechanical valve-train. An air mass based control strategy actuating the throttle, ignition timing and boost mode timing is analyzed in simulation and then verified experimentally for various operation conditions.

In simulation and experiments it is shown that the engine can also be pneumatically started within 350 ms if a camshaft driven CV is used. Furthermore, the best tank filling performance is achieved at high engine speeds and at low tank pressures.

Finally, the individual design methodologies are merged to an overall system design approach. It guarantees that the system performance is maximized rather than each individual mode. In a concluding design example the valve timings of each mode as well as an appropriate tank size are determined. For a compact class vehicle which is propelled by a 0.75 l TC SI engine it turns out that an air tank of less than 10 l is sufficient.

Zusammenfassung

Die pneumatische Hybridisierung in Kombination mit der Reduktion des Hubraums und der Turboaufladung ist ein vielversprechender Ansatz, um den Kraftstoffverbrauch von Ottomotoren zu senken, ohne dabei Kompromisse in der Fahrbarkeit einzugehen. Die anfallenden Zusatzkosten des Systems sind deutlich kleiner als diejenigen von Elektrohybriden.

Pneumatische Hybridmotoren verfügen über ein zusätzliches Ventil pro Zylinder. Das sogenannte Ladeventil verbindet die Brennkammer mit einem Drucklufttank. Die darin gespeicherte Druckluft wird für den Motorstart verwendet. Dieser ist genügend schnell, um auf den Leerlaufbetrieb verzichten zu können und somit eine Stop/Start-Funktionalität abbilden zu können. Die Einblasung von komprimierter Luft in den Brennraum während der Kompressionsphase ermöglicht es, mehr Kraftstoff einzuspritzen. Der sogenannte Boost-Modus führt daher zu einer deutlichen Verbesserung des Ansprechverhaltens und der Fahrbarkeit. Er macht die starke Hubraum-Reduktion in Kombination mit der Turboaufladung erst möglich.

Bis anhin wurden vollvariable Ventiltriebe vorgeschlagen für die Regelung des Lufttransfers zwischen dem Tank und den Brennräumen. Diese Ventiltriebe sind teuer, komplex und werden nicht in Serienproduktion gefertigt, was den Durchbruch der pneumatischen Hybridisierung bislang verhinderte. Im Gegensatz dazu sind nockenwellen-getriebene Ventile deutlich einfacher und kostengünstiger. Zudem sind sie bereits verfügbar und werden in Serienfahrzeugen eingesetzt. In dieser Arbeit wird evaluiert, ob und in welcher Form nockenwellen-getriebene Ladeventile mit fixen Steuerzeiten für die Steuerung des Lufttransfers zwischen dem Brennraum und dem Drucktank eingesetzt werden können. Nockenwellen-getriebene Ladeventile verfügen über eine eingeschränkte Variabilität. Durch geeignete Regelstrategien können immer noch alle Modi betrieben werden. Das Hauptaugenmerk liegt aber auf der Auslegung der Ladeventile, insbesondere auf deren Ventilhubkurven.

Im ersten Schritt werden die Betriebsmodi des pneumatischen Hybridmotors auf deren Kraftstoffeinsparpotential, die erforderliche Ventiltriebs-Variabilität und den Luftbedarf untersucht. Daraus folgt, dass auf den

Fahrzeugantrieb mit komprimierter Luft verzichtet wird und somit die komprimierte Luft nur noch zum Starten und Boosten eingesetzt wird. Das Antriebssystem wird folglich neu luftunterstützter turboaufgeladener Ottomotor genannt. Trotz der Vernachlässigung des pneumatischen Motor Modus beträgt das Kraftstoffesparpotential bei einer Halbierung des Hubvolumens immer noch 28 %.

Der Luftaustausch zwischen den Brennräumen und dem Tank hängt vom Tankdruck, von der Hubkurve und dem Durchmesser des Ladeventils ab. Die Hubkurve ist gekennzeichnet durch den Öffnungszeitpunkt, den Schliesszeitpunkt, die Beschleunigung und den maximalen Hub. Für jeden Betriebsmodus wird eine Ventil-Auslegungsmethodik präsentiert, anhand welcher ein geeignetes Hubkurvenprofil ermittelt werden kann. Die Einflüsse von Ventildurchmesser, Tankdruck und anderen Einschränkungen werden berücksichtigt. Die Methoden sind generisch und können für beliebige Motorgrößen mit unterschiedlichen Brennverfahren angewendet werden. Alle Auslege-Methoden werden für den 0.75l Zweizylinder-Prüfstandsmotor exemplarisch angewendet.

Der Boost Modus wird zur Verbesserung der Fahrbarkeit eingesetzt. Deshalb ist die Auslegung der Ventilhubkurve an eine Fahrbarkeits-Anforderung geknüpft. Der Effekt des Boost Modus mit nockenwellen-getriebenen Ladeventilen ist bei tiefen Drehzahlen am grössten. Der Boost Modus ist folglich hervorragend geeignet, um das Turboloch, welches bei tiefen Drehzahlen besonders ausgeprägt ist, zu überbrücken. Die Drehmomentregelung im Boost Modus wird durch die reduzierte Variabilität des Ventiltriebs erschwert. Für die Regelung des Drehmoments wird eine luftmassen-basierte Regelstrategie für die Drosselklappe, den Zündwinkel und die Ansteuerung der Ladeventile in Simulation untersucht und mit Messungen auf dem Prüfstand für verschiedene Betriebspunkte verifiziert. Zudem wird in Simulation und Experimenten gezeigt, dass der pneumatische Motorstart auch mit nockenwellen-getriebenen Ladeventilen realisiert werden kann. Mittels der Simulation mit einem Prozessmodell wird zudem gezeigt, dass das Füllen des Tanks bei hohen Drehzahlen und tiefen Tankdrücken am schnellsten erfolgt.

Abschliessend werden die einzelnen Auslege-Methoden zu einer Systemauslege-Methode zusammengeführt, mit der Absicht, die Performance des Gesamtsystems zu maximieren. In einem abschliessenden Beispiel werden die Ventilhubkurven der einzelnen Modi und eine geeignete Tankgrösse für den Prüfstandsmotor ermittelt. Für ein Fahrzeug der Kompaktklasse, welches mit einem 0.75l aufgeladenen Ottomotor ausgestattet ist, reicht ein Tankvolumen von 10l.