

MTZ

MOTORTECHNISCHE ZEITSCHRIFT

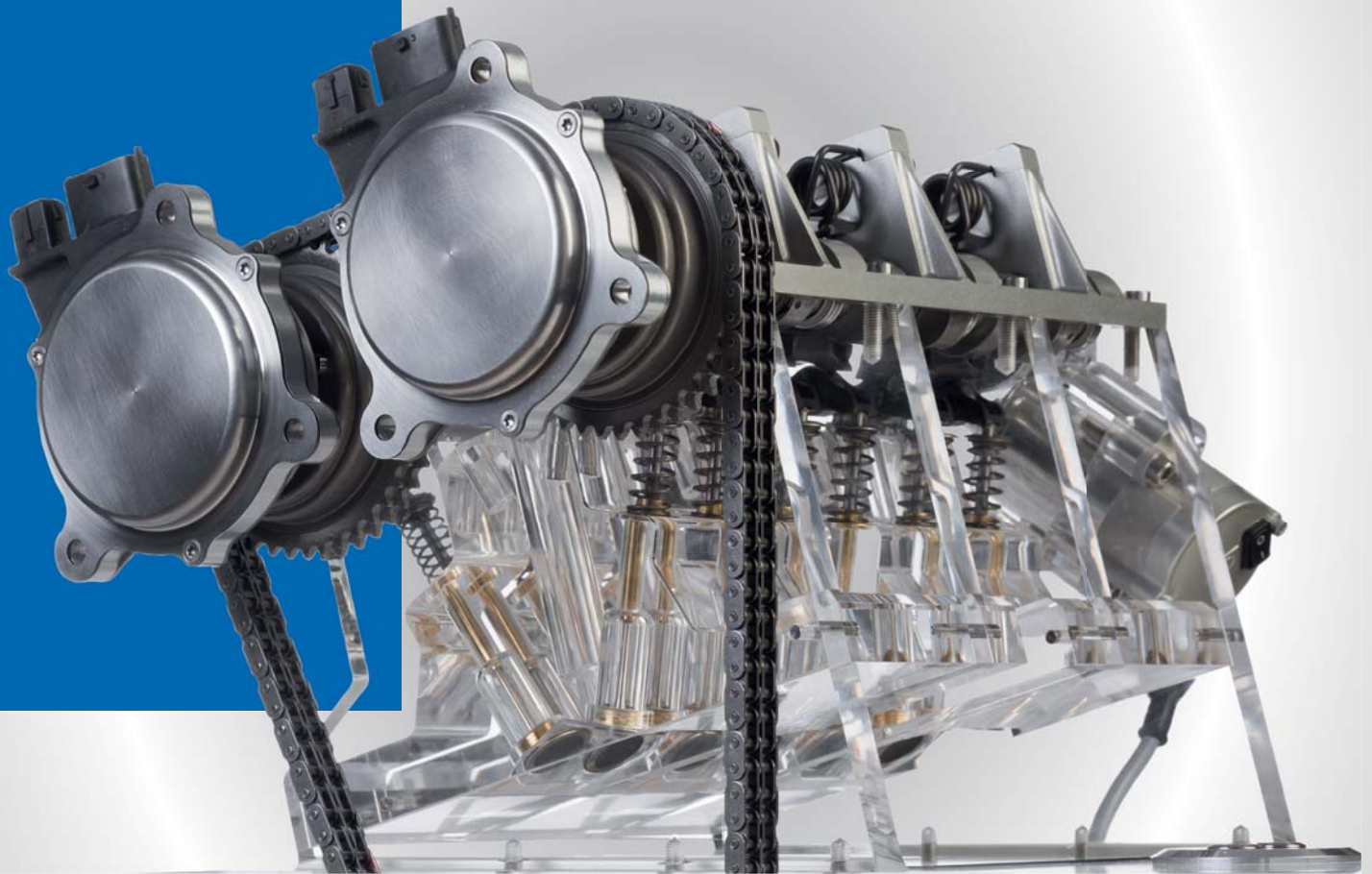
11 November 2013 | 74. Jahrgang

Sonderdruck/Offprint

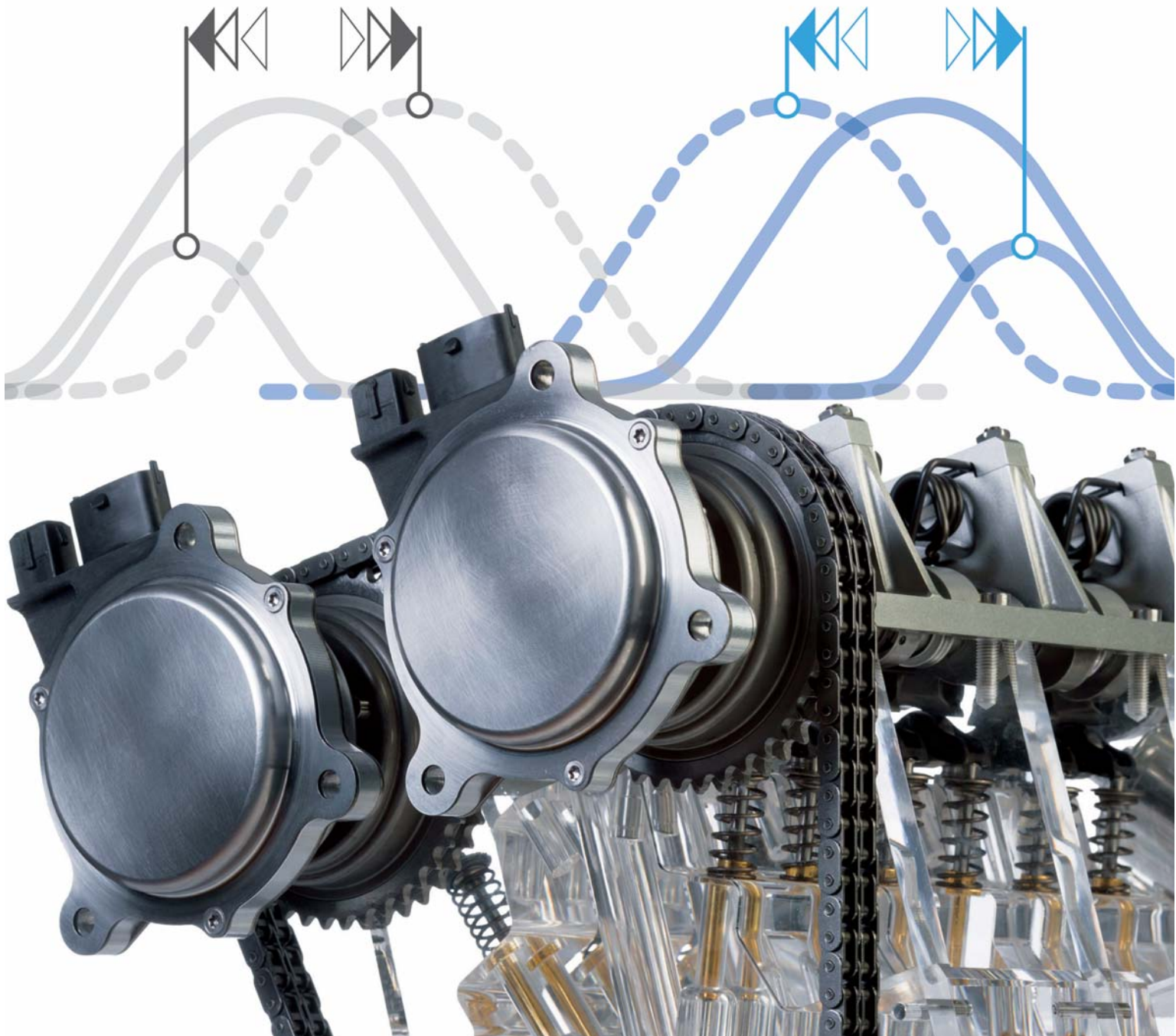
aus/from MTZ 11|2013

Springer Vieweg

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH



**MÖGLICHKEITEN ZUR KRAFTSTOFFEINSPARUNG
DURCH ELEKTRISCHE NOCKENWELLENVERSTELLUNG
POTENTIAL FUEL SAVINGS THROUGH ELECTRIC
CAMSHAFT ADJUSTMENT**



MÖGLICHKEITEN ZUR KRAFTSTOFF- EINSPARUNG DURCH ELEKTRISCHE NOCKENWELLENVERSTELLUNG

KSPG hat einen elektrischen Nockenwellenphasensteller entwickelt. Mittels Simulationen und Motortests zeigt das Unternehmen, welche Verbrauchspotenziale er in Kombination mit Technologien wie einem vollvariablen Ventiltrieb am Ottomotor erschließt.

AUTOREN



DR.-ING. KARL KREBBER-HORTMANN
ist Abteilungsleiter in der Vorentwicklung bei der Pierburg GmbH in Neuss.



DIPL.-ING. ANDREAS KÖSTER
ist Teamleiter in der Vorentwicklung bei der Pierburg GmbH in Neuss.



DR. RER. NAT. DIPL.-PHYS. ANDRES TÖNNEMANN
ist Experte für Systementwicklung in der Vorentwicklung bei der Pierburg GmbH in Neuss.



DIPL.-ING. COSTANTINO BRUNETTI
ist Konstrukteur in der Vorentwicklung bei der Pierburg GmbH in Neuss.

HÖHERE ANFORDERUNGEN AN DYNAMIK UND STELLBEREICH VON NOCKENWELLENPHASENSTELLERN

Die gesetzlichen Vorgaben zur CO₂-Reduktion und die voranschreitende Entwicklung elektrifizierter Antriebe schaffen neue Chancen für die Optimierung von Verbrennungsmotoren, bergen aber auch Herausforderungen. Neue wie auch bekannte Technologien kommen nun aus einer positiven Kosten-Nutzen-Analyse heraus zum Einsatz und zielen darauf ab, beachtliche Verbrauchspotenziale zu heben.

Nockenwellenphasensteller zur Beeinflussung der Ventilsteuerzeiten sind bei Ottomotoren Standard und gewinnen zunehmend bei Dieselmotoren an Bedeutung [1, 2, 3]. Bei der Auswahl des Aktuators für die Phasenverstellung der Nockenwelle wurden bisher elektro-hydraulische den rein elektrischen Systemen vorgezogen. Neue Betriebsarten wie Start-Stopp, Atkinson-Steuerverfahren, drosselfreie Laststeuerung mittels vollvariabler Ventiltriebe und neue Brennverfahren wie Controlled Auto Ignition (CAI) beziehungsweise Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) stellen höhere Anforderungen an Dynamik und Stellbereich der Nockenwellenphasensteller. Die in Diskussion befindlichen Fahrzyklen wie der WLTP-Zyklus (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures) und damit verbundene neue Testbedingungen sind weitere Treiber für eine leistungsfähigere Phasenverstellung. Für Otto- und Dieselmotoren gilt es, folgende Ver-

fahren mithilfe variabler Ventiltriebe zu realisieren:

- : Last- und Ladungstemperatursteuerung durch frühes und spätes Einlass-Schließen (FES und SES)
- : Restgassteuerung durch Ventilüberschneidung oder Brennraumrückführung bei CAI
- : Abgastemperatursteuerung durch frühes Auslass-Öffnen (FAÖ)
- : Ladungsbewegungssteuerung durch unsymmetrisches Schließen der Einlassventile.

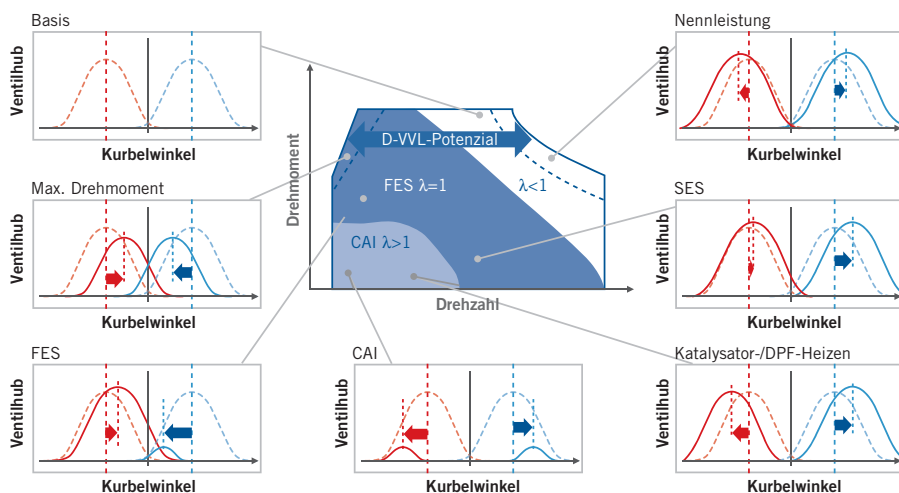
Darüber hinaus ist die Auslegung der für die Volllast optimalen Ventilerhebung bei unveränderlichem Ventilhub stets ein Kompromiss, der mithilfe des Phasenstellers zum Teil ausgeglichen werden kann. Im Idealfall wird das System jedoch durch einen variablen Ventilhub ergänzt. Angepasst an die Erfordernisse der Zielgrößen

- : maximale Füllung und minimierter Restgasgehalt an der Volllast
- : drosselfreie Laststeuerung in der Teillast
- : Restgas- und Füllungssteuerung optimiert für CAI
- : Temperatursteuerung für die Abgasnachbehandlung

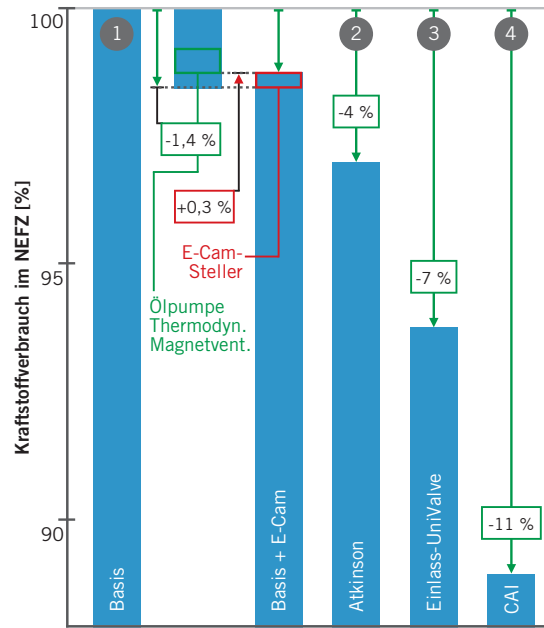
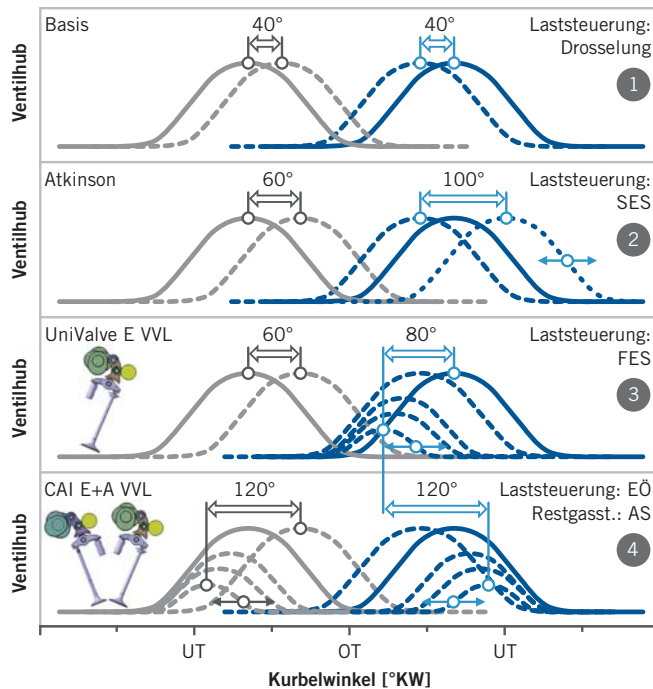
zeigt **1** am Beispiel des Kennfelds eines aufgeladenen Ottomotors qualitativ die optimalen Ventilerhebungskurven in den jeweiligen Kennfeldbereichen.

Während konventionelle Ottomotoren auf einen Stellbereich des Phasenwinkels ϕ von 40 bis 60 °KW ausgelegt werden, erfordert eine vollvariable Einlassventilhub-Steuerung durch Systeme wie das sogenannte UniValve [5] schon eine Erweiterung auf bis zu 80 °KW. Die Umsetzung einer kontrollierten Selbstzündung setzt die variable Steuerung des Ventilhubes auf der Ein- und Auslassseite und bei Applikation beider Teillastverfahren FES und CAI einen entsprechend großen Stellbereich von circa 120 °KW voraus, um das volle Potenzial nutzen zu können [4]. Dabei wird im CAI-Betrieb der Restgasgehalt über das Auslass-Schließen eingestellt und die verbleibende Frischluftmasse wesentlich durch das Einlass-Öffnen bestimmt. Für einen transienten Wechsel der Betriebsarten FES und CAI wird ein möglichst schneller – im Idealfall zyklussynchroner – Wechsel der Steuerzeiten gefordert.

Bei Dieselmotoren befinden sich erste Anwendungen hydraulischer Phasensteller in Serienproduktion, die entweder



1 Ventilhubkurven und Phasenstellbedarf für ottomotorische Brennverfahren mit vollvariablem Ventiltrieb (qualitative Darstellung)



EÖ: Einlass-Öffnen, AS: Auslass-Schließen
 FES: frühes Einlass-Schließen
 SES: spätes Einlass-Schließen
 EPS: Einlass-Phasensteller, APS: Auslass-Phasensteller
 VVL: Variable Valve lift, VVT: Variable Valve Timing
 CAI: Controlled Auto Ignition

Motor	1,4 l	1,4 l	1,4 l	1,4 l	1,3 l
P_e [kW/l]	84	84	84	84	90
	hyd. VVT	el. VVT	el. VVT	el. VVT	el. VVT
EPS [°KW]	40	40	100	80	120
APS [°KW]	40	40	60	60	120
UniValve	—	—	—	E	E und A

② Ventilerhebungskurven (qualitativ) der untersuchten Konzepte (links) und Simulation des Kraftstoffverbrauchspotenzials im NEFZ (Fahrzeuggewicht 1470 kg, aufgeladener 1,4-l-Ottomotor mit Direkteinspritzung) (rechts)

zur Temperatursteuerung [1] oder zur Beeinflussung der Füllung, der Kompressionsendtemperatur, der Ladungsbewegung oder der Restgasgehalte eingesetzt werden [2].

POTENZIAL ZUR KRAFTSTOFFVERBRAUCHSENKUNG AM OTTOMOTOR

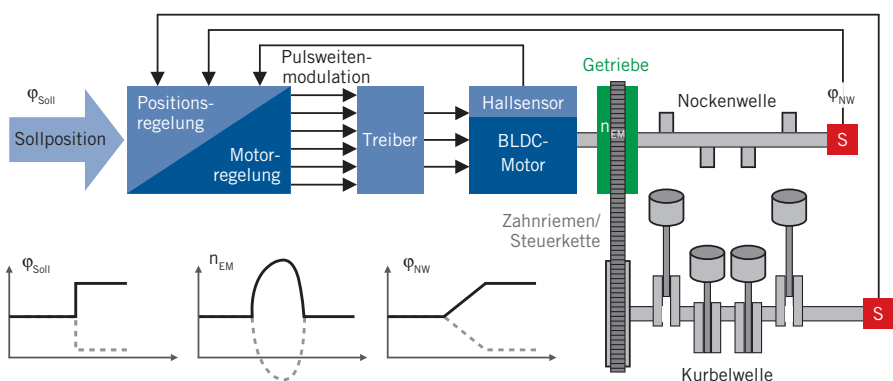
Um die Effekte der einzelnen Technologien auf den Kraftstoffverbrauch im NEFZ zu bewerten, wird ein Basismotor mit hydraulischen Phasenstellern auf ein- und auslassseitig elektrifizierte Steller umgerüstet, ②. Die Umstellung auf elektrische Phasensteller ermöglicht durch eine optimierte Ölpumpenauslegung, eine vom Öldruck unabhängige Steuerung der Winkellage im Kaltstart, eine optimale Start-Stopp-Ablaufsteuerung sowie den Entfall der elektromagnetischen Steuerventile einen Verbrauchsvorteil von 1,4 %. Die Leistungsaufnahme der beiden elektrischen Phasensteller kompensiert einen Teil dieses Potenzials und wird mit 0,3 % bewertet. Bei einem Ottomotor erlaubt der

erweiterte Stellbereich des elektrischen Phasenstellers eine Teilentdrosselung mit dem SES-Verfahren. Das Atkinson-Verfahren (Variante 2 in ②) senkt an einem aufgeladenen 1,4-l-Motor mit Direkteinspritzung den Verbrauch um 4 %. Dabei sind die Vorteile durch den elektrischen Phasensteller eingerechnet.

Weitere Verbrauchspotenziale ergeben sich durch einen vollvariablen Ventiltrieb

auf der Einlassseite, der eine drosselfreie Laststeuerung zulässt [5]. Durch das vollvariable elektromechanische Ventiltriebssystem UniValve werden neben der Entdrosselung im Teillastbereich auch Vorteile wie optimale Ventilhubhöhe in der Volllast, verbessertes Ansprechverhalten des Turboladers bei Lastsprüngen und eine reduzierte Ventiltriebsreibung erschlossen. In Summe ergibt sich

③ Systemübersicht elektrischer Phasensteller



für die Variante 3 in ② ein um 7 % reduzierter NEFZ-Verbrauch. Bei allen bisherigen Varianten wird davon ausgegangen, dass die spezifische Leistung konstant bleibt, wobei für die Variante 3 ein verbessertes Drehmomentverhalten bei geringen Drehzahlen (Low-end Torque) mit entsprechend angepasster Getriebeübersetzung berücksichtigt wurde. Der vollvariable Ventiltrieb auf der Ein- und Auslassseite verbessert die Vollast des aufgeladenen Ottomotors, sodass der Hubraum für identische Fahrleistungen auf 1,3 l reduziert werden kann. Mit einem auf 120 °KW erweiterten Stellbereich der beiden elektrischen Phasensteller sind die Voraussetzungen für die Applikation der CAI gegeben, die im Lastbereich unterhalb von $p_{me} = 6$ bar Verbrauchsvorteile bis circa 20 % ermöglicht [6]. Im Kennfeldbereich oberhalb 6 bar effektivem Mitteldruck kann durch die hohe Stellrate der elektrischen Phasensteller innerhalb weniger Zyklen von CAI auf FES umgestellt werden. Nur durch die Kombination beider Teillastverfahren und der Lastpunktverschiebung wird eine Verbrauchseinsparung von 11 % im NEFZ erzielt.

TECHNISCHER LÖSUNGSANSATZ

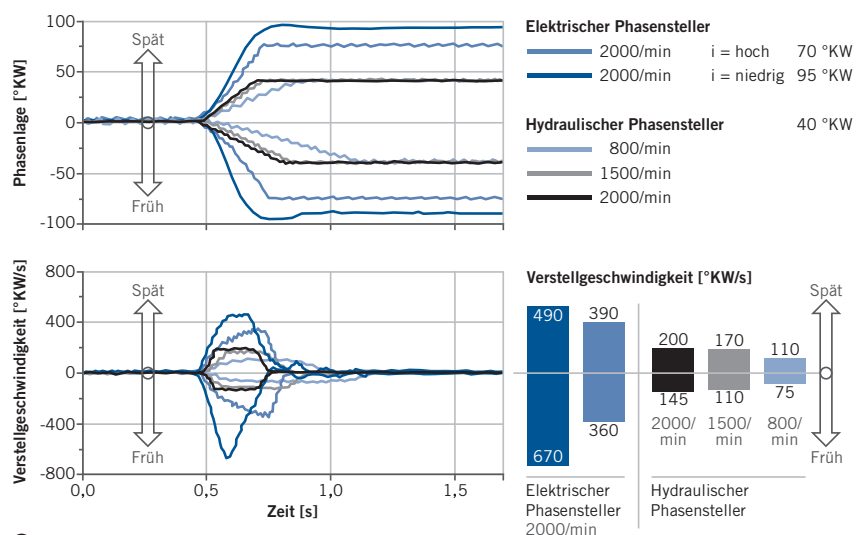
Die untersuchten Konzepte in ② stellen folgende Anforderungen an das Ventiltriebssystem:

- : hohe Verstellgeschwindigkeiten
 $\dot{\phi} > 300$ °KW/s
- : große Stellbereiche > 120 °KW
- : hohe Regelgenauigkeit der Phasenlage
 < 1 °KW stationär und < 2 °KW dynamisch
- : Unabhängigkeit von der Druckölversorgung
- : Phasenverstellung während des Kaltstartvorgangs
- : geringe elektrische Leistungsaufnahme < 10 W.

Dementsprechend wurde ein elektrischer Phasensteller entwickelt, der im Wesentlichen aus drei Subsystemen besteht:

- : hochuntersetzendes Überlagerungsgetriebe
- : bürstenloser Gleichstrommotor (BLDC-Motor)
- : Elektronik zur Motoransteuerung und Phasenregelung.

Das Überlagerungsgetriebe wird direkt auf die Nockenwelle geflanscht und zur Beibehaltung der Phasenlage synchron mit der Nockenwellendrehzahl vom



④ Messungen der Phasensprünge des hydraulischen versus des elektrischen Phasenstellers am Verbrennungsmotor ($T_{mot} = 90$ °C)

BLDC-Motor angetrieben. Die eigentliche Phasenverstellung erfolgt durch Einstellung einer temporären Differenzdrehzahl zwischen Elektromotor und Nockenwelle. In ③ (unten links) wird die Regelkette schematisch dargestellt. Die Frühverstellung erfolgt durch Verlangsamung oder gegensinnige Drehung des Elektromotors, die Spätverstellung durch Drehzahlerhöhung. Der Phasenstellbereich des ausgewählten Getriebekonzepts ist prinzipiell unbegrenzt. Die Auslegung bezüglich der realisierbaren Stellgeschwindigkeiten hängt ab von der Leistung des Elektromotors, den Nockenwellenlastmomenten und der Getriebeübersetzung. Die Standübersetzung zwischen Motor- und Nockenwellenanschlusswelle wird dabei so hoch gewählt, dass sich die wechselnden Nockenwellenmomente weitgehend an der Kurbelwelle abstützen. Hohe Stellraten, wie für CAI oder Hochdrehzahlkonzepte notwendig, verlangen eine angepasste Auslegung und stellen hohe Ansprüche an das Phasenreglerkonzept. Dieses basiert im Normalfall auf der üblichen Sensorik an Kurbel- und Nockenwelle sowie der Rotorlagensensorik des BLDC-Motors.

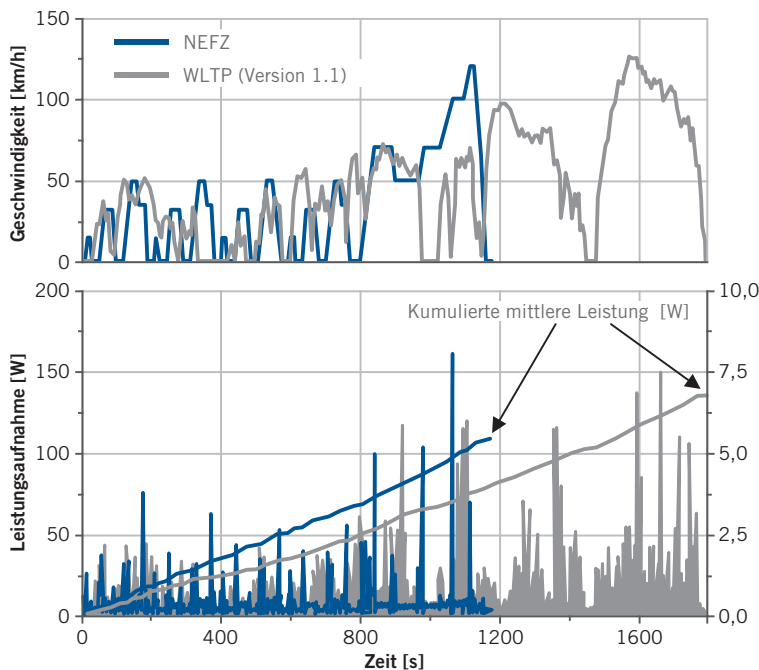
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Nach erfolgter Validierung der Systeme am Komponentenprüfstand werden Messungen am Verbrennungsmotor durchgeführt. Der Basismotor ist serienmäßig mit hydraulischen Phasenstellern ausgerüstet und wird nach der Modifikation

mit zwei verschiedenen Auslegungen des elektrischen Phasenstellers betrieben.

Die Analyse des Versuchsträgers mit einem konventionellen hydraulischen Phasensteller ohne aktive Elemente zur Steigerung der Stellrate zeigt, dass die Stellgeschwindigkeit vom Öldruck und von der Verstellrichtung abhängig ist. Der hydraulische Phasensteller erreicht ab $n = 2000/\text{min}$ die maximale Stellgeschwindigkeit von circa 200 °KW/s, ⑤. Die Variante des elektrischen Phasenstellers mit hohem Getriebeübersetzungsverhältnis ermöglicht bei $n = 2000/\text{min}$ eine Phasenverstellung zwischen 390 und 360 °KW/s. Die Variante mit niedrigem Übersetzungsverhältnis und entsprechendem Elektromotor erlaubt bis zu 670 °KW/s. Höhere Stellraten bis über 1000 °KW/s können durch eine angepasste Elektromotorauslegung dargestellt werden.

Zum Verständnis des Gesamtsystems wird ein physikalisches Modell des elektrischen Nockenwellenphasenstellers in Matlab/Simulink abgebildet. Um eine Aussage über das dynamische Verhalten der Einzelkomponenten und eine Vorhersage der elektrischen Leistungsaufnahme in einem Fahrzyklus treffen zu können, wird Matlab/Simulink an das Programm GT-Drive gekoppelt. Die simulierte mittlere Leistungsaufnahme der elektrischen Maschine beträgt im NEFZ 5,4 W und im wesentlich dynamischeren WLTP-Zyklus 7,4 W, ⑥. Trotz der höheren Anforderungen an die Stellgeschwindigkeiten ergibt sich nur eine



5 Gekoppelte Simulation Matlab/Simulink und GT-Drive im NEFZ und WLTP-Zyklus (Fahrzeuggewicht 1470 kg, aufgeladener 1,4-l-Ottomotor mit Direkteinspritzung)

moderate Zunahme der elektrischen Leistungsaufnahme.

Um die Berechnung zu verifizieren und den elektrischen Phasensteller mit hohem Übersetzungsverhältnis unter den realen Belastungen des Verbrennungsmotors zu testen, werden Messungen am transienten Motorprüfstand im NEFZ durchgeführt, 6. Der Stellbereich für die gewählte Applikation des aufgeladenen 1,4-l-Motors beträgt 40 °KW. Der elektrische Phasensteller folgt der Phasenlagenvorgabe in den transienten Betriebszuständen nach Stopp des Motors mit einer maximalen Abweichung vom Sollwert von 2 °KW. Die am Prüfstand gemessene mittlere Leistungsaufnahme beträgt 9,7 W. Maximal werden im NEFZ Leistungsaufnahmen von bis zu 60 W gemessen. Für Fahrzyklen wie dem FTP- oder dem WLTP-Zyklus, in denen höhere Beschleunigungswerte erforderlich sind, werden Werte von bis zu 12 W im Mittel und kurzzeitige Maxima (< 0,2 s) bis 150 W ermittelt.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

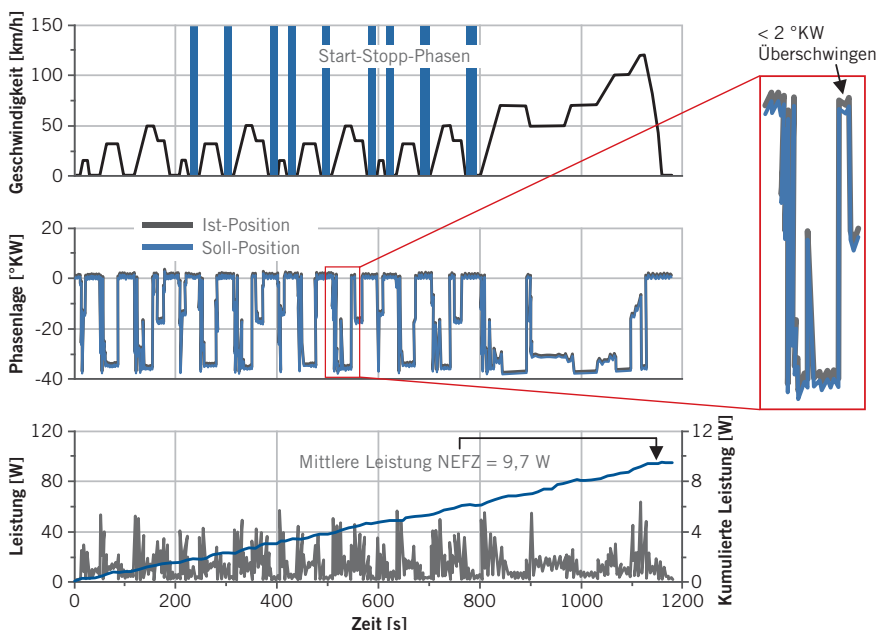
Der bei Pierburg entwickelte elektrische Nockenwellenphasensteller ermöglicht in Kombination mit Technologien wie dem vollvariablen Ventiltrieb die Er-

schließung beachtlicher Verbrauchspotenziale am Ottomotor. Die von der Ölversorgung unabhängige Phasenverstellung erlaubt eine auf die Anfor-

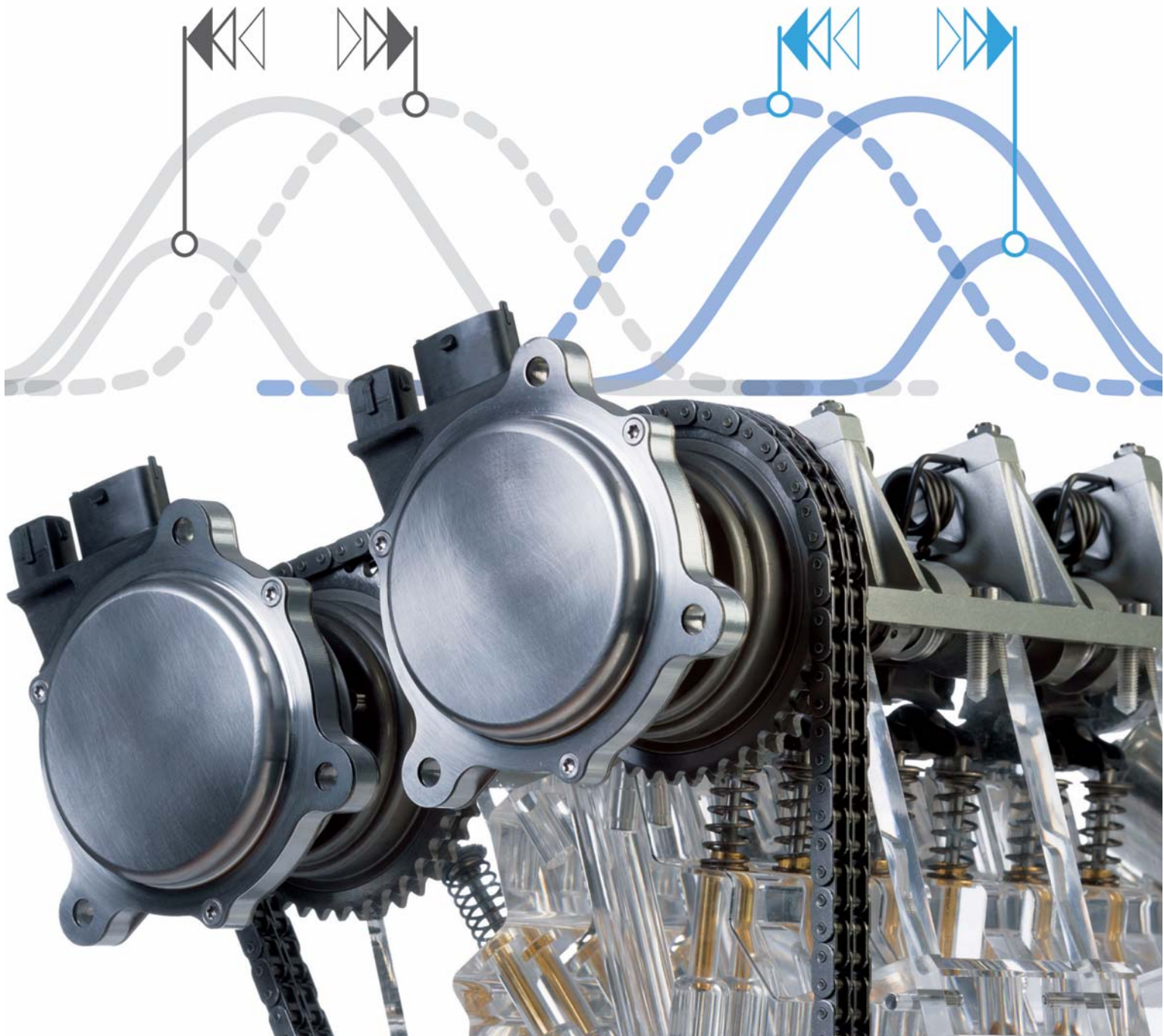
derungen von Thermodynamik und Komfort optimierte Steuerung der Ventile bei jeder Temperatur. Damit stellt sie auch in neuen Fahrzyklen und bei veränderten Testbedingungen eine Grundlage für die kontinuierliche Verbesserung der Verbrennungsmotoren dar. Bei Dieselmotoren werden sich die Eigenschaften elektrischer Phasenverstellung, wie hohe Regelgenauigkeit und Verstellraten sowie Positionierbarkeit im Motorstart, in verbesserte Emissionen umsetzen lassen.

LITERATURHINWEISE

- [1] Herrmann, H.-O.; Nielsen, B. et al.: Mittelschwerer Nfz-Motor von Mercedes-Benz. In: MTZ 73 (2012), Nr. 10, S. 730-738
- [2] Neusser, H.-J.; Kahrstedt, J. et al.: Die Euro-6-Motoren des modularen Dieselmotorkastens von Volkswagen. In: MTZ 74 (2013), Nr. 6, S. 440-447
- [3] Diezemann, R. et al.: Anhebung der Abgastemperatur am Dieselmotor durch variablen Ventiltrieb. In: MTZ 74 (2013), Nr. 4, S. 308-315
- [4] Karl, G. et al.: Raumzündverbrennung – ein alternativer motorischer Ansatz zur Verbrauchsreduzierung am Ottomotor. 12. Tagung „Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors“, Graz, 2009
- [5] Breuer, M. et al.: Fully variable Valve Lift System UniValve: More than a smart Throttle Body. 20. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motortechnik, 2011
- [6] Fürhapter, A. et al.: Homogene Selbstzündung, die praktische Umsetzung am transienten Vollmotor. In: MTZ 65 (2004), Nr. 2, S. 94-101



6 NEFZ-Messung am Prüfstand, elektrischer Phasensteller mit 40 °KW Verstellbereich (Fahrzeuggewicht 1470 kg, aufgeladener 1,4-l-Ottomotor mit Direkteinspritzung)



POTENTIAL FUEL SAVINGS THROUGH ELECTRIC CAMSHAFT ADJUSTMENT

KSPG has developed an electric variable cam timing system. Using simulations and engine tests, KSPG demonstrates the potential reduction in fuel consumption that the system offers when combined with technologies such as fully variable valve gear in a gasoline engine.

AUTHORS



DR.-ING.

KARL KREBBER-HORTMANN

is Department Manager in Advanced Engineering of the Pierburg GmbH in Neuss (Germany).



DIPL.-ING. ANDREAS KÖSTER

is Team Leader in Advanced Engineering of the Pierburg GmbH in Neuss (Germany).

DR. RER. NAT. DIPL.-PHYS.
ANDRES TÖNNEMANN

is Systems Development Expert in Advanced Engineering of the Pierburg GmbH in Neuss (Germany).



DIPL.-ING. COSTANTINO BRUNETTI

is Design Engineer in Advanced Engineering of the Pierburg GmbH in Neuss (Germany).

DYNAMIC CAMSHAFT TIMING WITH A BROAD RANGE OF ADJUSTMENT NEEDED

New governmental regulations to further cut CO₂ emissions and the continuing progress in the field of electric drive technology present new facts and challenges for the development of the internal combustion engine. New technologies and older, familiar ones are now being applied in the wake of a positive cost-benefit analysis, seen as having considerable potential for enhancing fuel efficiency.

Cam phasers for valve timing control represent the state of the art in gasoline-powered engines and are of increasing significance in diesel-powered engines also [1, 2, 3]. Up until now, when selecting the actuator for phase adjustment of the camshaft, electro-hydraulic systems were preferred. New operating modes such as start/stop, Atkinson control procedures, non-throttle load control via fully variable valve drives and new combustion techniques such as Controlled Auto Ignition (CAI) and Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) confront camshaft phase shifters with stiffer requirements regarding dynamics and adjustment range. Driving cycles now under discussion such as WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures) and the associated new test conditions constitute further drivers for improved performance phase shifting. For gasoline- and diesel-powered engines

alike, the task at hand now is to develop the following processes with the aid of variable valve drives:

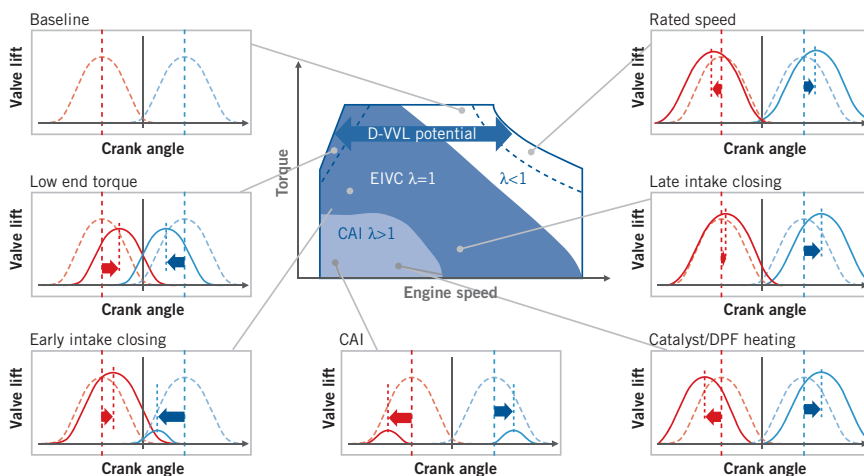
- : load and charge temperature control by early and late inlet valve closure (EIVC and LIVC)
 - : residual gas control through valve overlap and combustion chamber recirculation with CAI
 - : exhaust gas temperature control through early exhaust valve opening (EEVO)
 - : charge motion control through non-symmetrical closure of the inlet valves.
- Furthermore, if the valve stroke remains constant, there is always a compromise in the design of the optimum valve stroke for the full load, which is partly offset with the help of the phase shifter and should, however, ideally be supplemented with a variable valve lift. Adapted to the requirements of the objectives
- : maximum load and minimal residual gas content in the full load
 - : non-throttle load control in the partial load
 - : residual gas and load control, optimised for CAI
 - : temperature control for exhaust gas after-treatment

the qualitatively optimum valve control diagrams in the respective maps of characteristics are shown in ❶, taking the characteristics diagram of a turbo charged gasoline engine as an example.

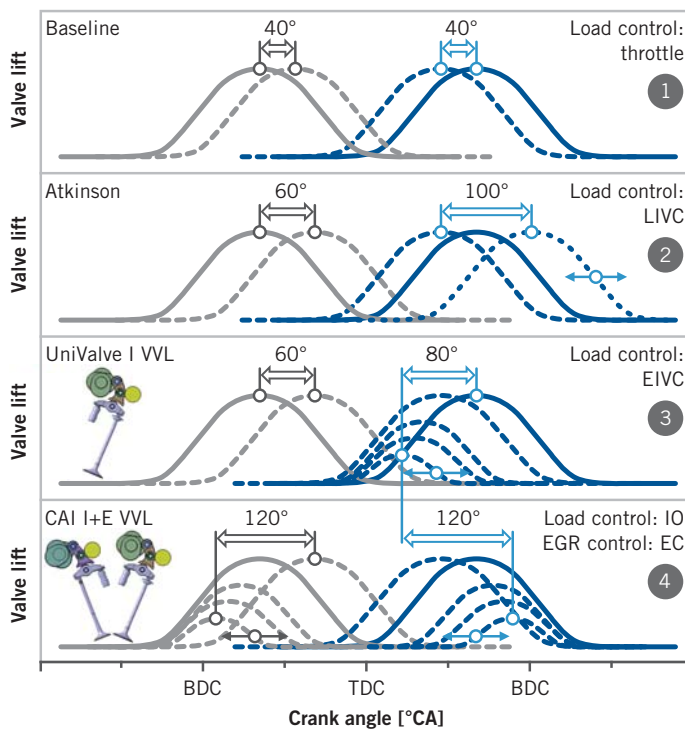
Whereas conventional gasoline engines are designed with an adjustment range for the phase angle ϕ of 40 to 60 °CA, the fully variable inlet valve stroke already requires an expansion of up to 80 °CA, attained through systems such as the so-called UniValve [5].

Implementation of a CAI requires variability of the valve stroke on the inlet and outlet sides and, if the EIVC and CAI partial load procedures are applied, requires a correspondingly large adjustment range of approximately 120 °CA in order to be able to exploit the full potential [4]. In CAI operation, the residual gas content is adjusted via outlet closure, while the remaining fresh air mass is essentially determined by opening the inlet. In order to achieve a transient switch between the EIVC to the CAI operating modes, the switch in control times should be as fast as possible and, ideally, cycle-synchronous.

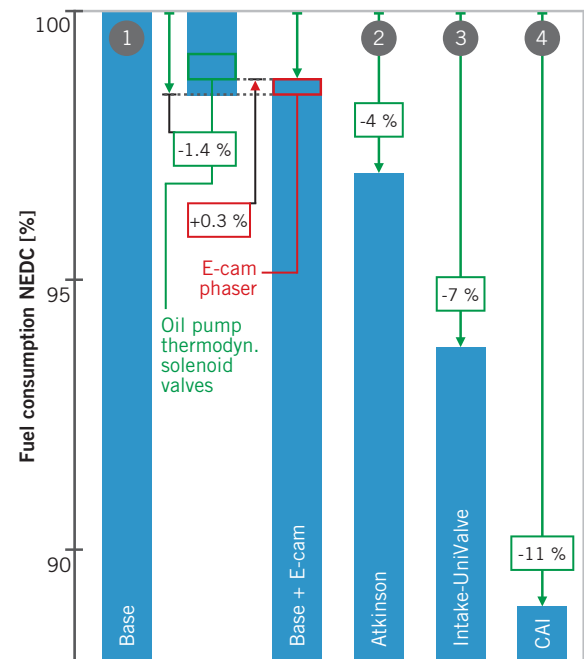
In the case of diesel engines, the first applications of hydraulic phase shifters



❶ Valve control diagram and phase adjustment requirement for gasoline engine combustion processes with fully variable valve drive (qualitative illustration)



IO: Intake open, EC: Exhaust close
 EIVC: Early intake valve closing
 LIVC: Late intake valve closing
 ICP: Intake cam phaser, ECP: Exhaust cam phaser
 VVL: Variable valve lift, VVT: Variable valve timing
 CAI: Controlled Auto Ignition



Engine	1.4 l	1.4 l	1.4 l	1.4 l	1.3 l
P_e [kW/l]	84	84	84	84	90
	hyd. VVT	el. VVT	el. VVT	el. VVT	el. VVT
ICP [°CA]	40	40	100	80	120
ECP [°CA]	40	40	60	60	120
UniValve	—	—	—	I	I and E

② Control diagrams of the investigated concepts (qualitative, left) and simulation of the fuel consumption potential in the NEDC (vehicle weight 1470 kg, 1.4-l TC DI gasoline engine) (right)

are now in series production, and are used either in temperature control [1] or for influencing filling, the final compression temperature, the charge motion or the residual gas content [2].

POTENTIAL FOR SAVING FUEL IN GASOLINE-POWERED ENGINES

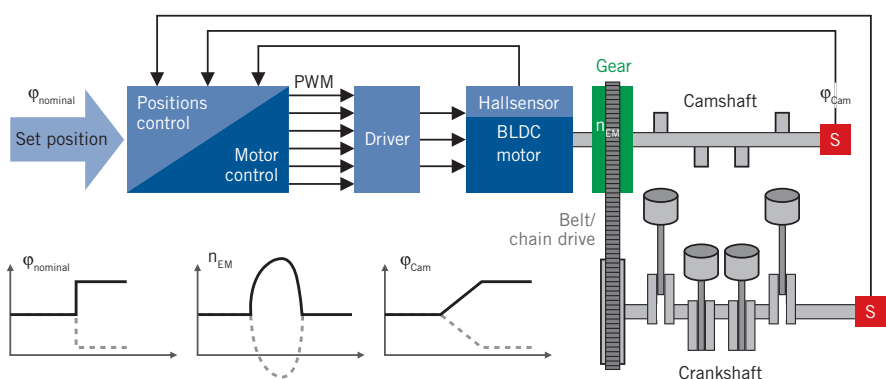
In order to evaluate the effects of the individual technologies with respect to the attainable fuel consumption in NEDC, the basic engine is equipped with two hydraulic cam phasers on the inlet and outlet sides, ②. The switch to electric cam phasers enables a 1.4 % reduction in fuel consumption owing to optimised oil pump layout, control of the angle position during cold starts without depending on oil pressure, an optimum start/stop sequence control as well as the elimination of electromagnetic control valve. The power consumption of the two electric phase shifters compensates for part of this potential, and is evalu-

ated at 0.3 %. In gasoline engines, the expanded adjustment range of the electric phase shifter enables partial de-throttling with the LIVC strategy. In a 1.4-l turbocharged DI engine, the Atkinson procedure (variant 2 in ②) enables a reduction in consumption of 4 % when

the advantages of the electric phase shifter are included.

Additional consumption potential arises from a fully variable valve drive on the inlet side, which permits throttle-free load control [5]. The fully variable electromechanical valve drive system

③ System overview of electric cam phaser



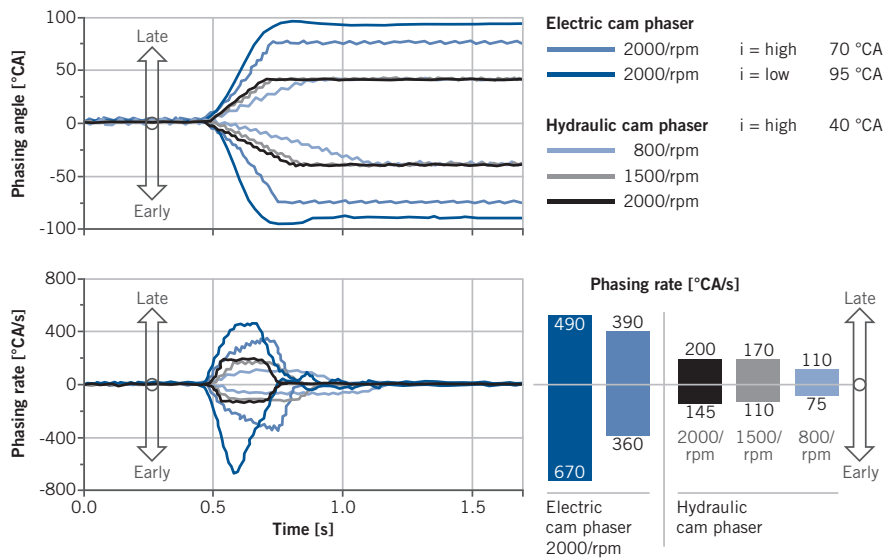
UniValve, offers beside de-throttling in the partial load range, further advantages such as optimum valve stroke in full load, improved responsiveness of the turbo-charger during load steps, and reduced valvetrain friction. In total, variant 3 in ② results in a 7 % reduction in NEDC consumption. In the case of all the previous variants, it is assumed that the specific output remains constant, with an improved low-end torque with a correspondingly adjusted transmission ratio for variant 3 in ② taken into account. The fully variable valve drive on the inlet and outlet sides improves the full load of a turbocharged gasoline engine, meaning that the displacement can be reduced to 1.3 l while still producing identical driving performance. With an expanded adjustment range of 120 °CA in both electric phase shifters, the conditions are established for CAI, which, in the load range below BMEP = 6 bar results in consumption advantages of approximately 20 % [6]. In the characteristics diagram above 6 bar brake mean effective pressure, the electric phase shifter can go from CAI to EIVC within a few cycles owing to the high adjustment rate. Fuel savings of 11 % in the NEDC can be attained only by combining both partial load procedures and shifting the load point.

TECHNICAL SOLUTION

In accordance with the following engine requirements of the investigated variants in ②:

- : high shifting speeds $\dot{\phi} > 300$ °CA/s
 - : large adjustment range > 120 °CA
 - : high control accuracy of the phase position < 1 °CA stationary, < 2 °CA dynamic
 - : independence from pressure oil supply
 - : phase shifting during cold starts
 - : low electric power consumption < 10 W
- an electric cam phaser was developed. It essentially consists of the three subsystems:
- : high reduction superposition gear
 - : BLDC electromotor
 - : electronics for commutation and phase control.

The superposition gear is directly flanged to the camshaft and, to keep the phase position in synchrony with the camshaft rotations, is driven by the BLDC motor. The actual phase shift takes place through adjustment of the temporary differential



④ Measurements of the phase shift of hydraulic versus electric cam phasers in an internal combustion engine ($T_{\text{engine}} = 90$ °C)

speed between the electromotor and camshaft. The control chain is depicted in ③ (bottom left). The early adjustment occurs through the slowing or counter rotation, the late adjustment through an increase in the number of rotations. In principle, the phase adjustment range of the selected gear concept is unlimited. With respect to the attainable adjustment speeds, the design depends on the output of the electromotor, the camshaft driving torque and the gear ratio. Here, the standard ratio between the engine and camshaft connector shaft is set so high that the alternating camshaft moment largely rests on the crankshaft. High adjustment rates, e.g. for CAI or high revolution concepts, demand a modified design and pose major requirements on the phase controller concept. Normally this is based on standard sensors on the crankshaft and camshaft as well as the rotor position sensors of the BLDC motor.

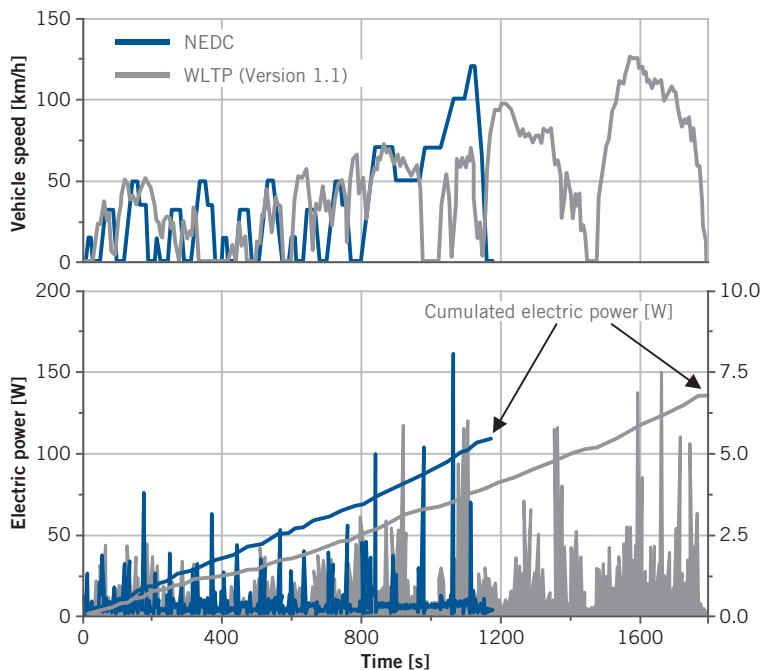
EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS

Following validation of the systems on the component test bench, measurements are conducted with an internal combustion engine. The basic engine features hydraulic cam phasers as stand-

ard equipment, driven by two different electric phase shifter designs.

Analysis of the test engine with a conventional hydraulic cam phaser without active elements for increasing the adjustment rate results in an adjustment speed dependent on the oil pressure and adjustment direction. Starting at $n = 2000$ rpm the hydraulic phase shifter reaches the maximum adjustment speed of approximately 200 °CA/s, ④. At $n = 2000$ rpm, the variant of the electric phase shifter with a high gear ratio enables a phase shift between 390 and 360 °CA/s, while the variant with the lower gear ratio and a corresponding electromotor, up to 670 °CA/s. Higher adjustment rates of above 1000 °CA/s can be attained with a modified electromotor design.

For a better understanding of the entire system a physical model of the electric camshaft phaser is depicted in Matlab/Simulink. In order to obtain evidence concerning the dynamic behaviour of the individual components and a prediction of the electrical power consumption in a driving cycle, Matlab/Simulink is coupled to GT-Drive. The simulated average power consumption in NEDC lies in the region of 5.4 W, and with the considerably more dynamic WLTP, roughly 7.4 W, ⑤. Despite the



5 Coupled simulation Matlab/Simulink and GT-Drive in NEDC and WLTP (1.4-l TC DI gasoline engine, 1470 kg)

higher requirements with regard to adjustment speeds, there is only a moderate increase in electric power consumption.

In order to verify the calculation and test the electric phase shifter when subject to the stress of a real internal combustion engine, measurements are taken in the transient engine test bed in NEDC, 6. The adjustment range for the selected application of the 1.4-l TC engine is 40 °CA. The electric cam phaser adheres to the phase position protocol in the transient operating statuses following engine switch off with a maximum deviation from the set point of 2 °CA. The average power consumption measured in the test bed amounts to 9.7 W. In the NEDC, maximum levels of power consumption of up to 60 W were measured. For driving cycles such as the FTP or WLTP, in which higher acceleration values are required, the values recorded on average reached 12 W, with short-term maximums of (< 0.2 s) of up to 150 W.

SUMMARY AND OUTLOOK

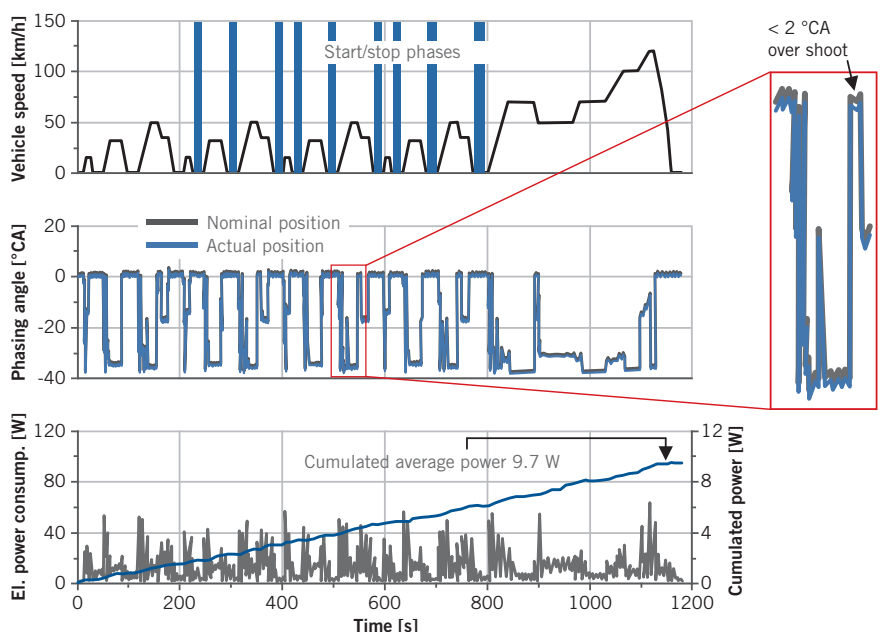
In combination with technologies such as fully variable valve drives, the electric cam phaser developed by Pierburg ena-

bles considerable fuel savings in gasoline engines. Non-oil pressure-dependent cam phasing enables optimum control of

valves at all temperatures, thus laying the groundwork for a continuous improvement in internal combustion engines, while taking the full range of thermodynamic and comfort requirements into account, including for new driving cycles and test conditions. When applied in diesel engines, the characteristics of electric cam phasing such as high control accuracy and adjustment rates as well as positioning during engine start process can be put to work to cut emissions.

REFERENCES

- [1] Herrmann, H.-O.; Nielsen, B. et al.: Mittelschwerer Nfz-Motor von Mercedes-Benz. In: MTZ 73 (2012), No. 10, pp. 730-738
- [2] Neusser, H.-J.; Kahrstedt, J. et al.: Die Euro-6-Motoren des modularen Dieselmotorkonstruktion von Volkswagen. In: MTZ 74 (2013), No. 6, pp. 440-447
- [3] Diezemann, R. et al.: Anhebung der Abgastemperatur am Dieselmotor durch variablen Ventiltrieb. In: MTZ 74 (2013), No. 4, pp. 308-315
- [4] Karl, G. et al.: Raumzündverbrennung – ein alternativer motorischer Ansatz zur Verbrauchsreduzierung am Ottomotor. 12th Conference „Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors“, Graz, 2009
- [5] Breuer, M. et al.: Fully variable Valve Lift System UniValve: More than a smart Throttle Body. 20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2011
- [6] Fürhapter, A. et al.: Homogene Selbstzündung, die praktische Umsetzung am transienten Vollmotor. In: MTZ 65 (2004), No. 2, pp. 94-101



6 NEDC measurement on test bed, 40 °CA electric cam phaser (1.4-l TC DI gasoline engine, 1470 kg)



Warten nur auf Sie: spannende Aufgaben und die Erfolgsgefühle danach.

Bei uns ist noch ein Platz frei. Und wir haben ihn für Sie reserviert. Alles ist vorbereitet: Spannende Projekte liegen parat und das Team freut sich auf Sie. Doch eine gute Arbeitsatmosphäre ist nicht alles, was Sie bei der zum Rheinmetall Konzern gehörenden KSPG AG erwarten dürfen. Als einer der 100 größten Automobilzulieferer weltweit bieten wir Ihnen die Sicherheit eines Konzerns und zugleich den Spielraum eines Mittelständlers. Für Sie heißt das: ein Arbeitsplatz mit Gestaltungsmöglichkeiten, Perspektive und der Aussicht, international zu arbeiten. Hört sich gut an? Dann sollten Sie bei uns Platz nehmen. www.kspg.com