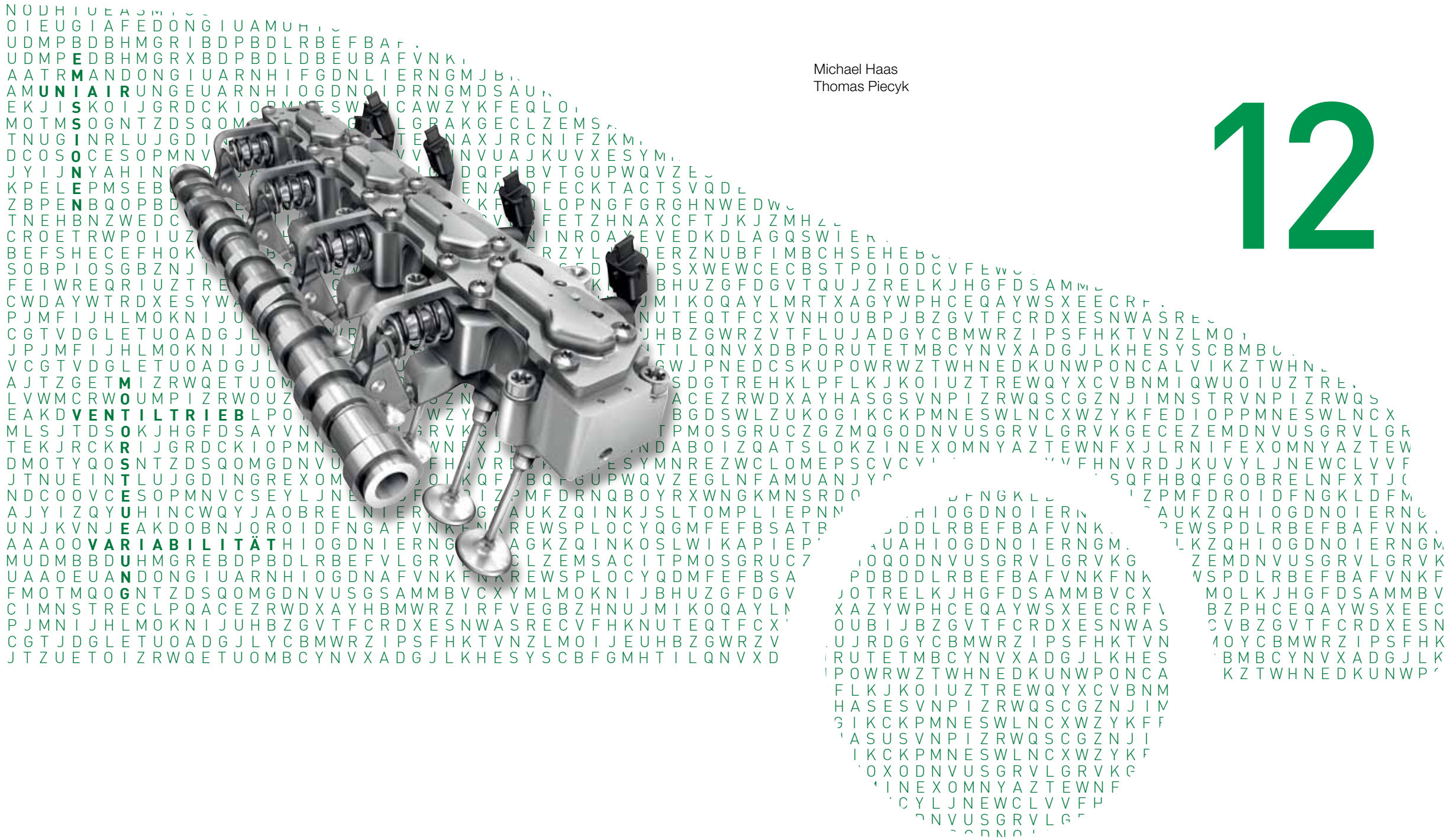

Ventiltriebe zur Umsetzung innovativer Verbrennungsstrategien

Michael Haas
Thomas Piecyk

12

Der variable Ventiltrieb – ein Werkzeug für mehr Effizienz

Verbrennungsmotoren müssen künftig weiter steigenden Anforderungen an die Emission von Kohlendioxid und Abgasschadstoffen erfüllen. Dem Ventiltrieb kommt dabei eine entscheidende Rolle zu: Einerseits soll er so gestaltet werden, dass beim Ladungswechsel geringe Verluste auftreten, andererseits schafft er die Voraussetzung für eine möglichst gute Gemischaufbereitung im Zylinder und damit eine wirkungsgradoptimale und schadstoffarme Verbrennung. Zudem beeinflussen die Ventilsteuerzeiten die Verbrennung direkt über die in Grenzen einstellbare Verdichtung und den im Zylinder verbleibenden Restgasanteil.

Die Variabilität von Ventiltrieben hat daher in den letzten Jahren stark zugenommen. Dabei sind zwei grundsätzliche Ansätze für höhere Variabilität zu beobachten:

1. das zeitliche Verschieben der Ventilerhebungskurve mit Hilfe von Nockenwellen-Phasenverstellern
2. die Variation der Ventilerhebungskurve bezüglich der Hubhöhe sowie des Öffnungs- und des Schließzeitpunktes und somit der daraus resultierenden Öffnungsdauer.

Nockenwellen-Phasenverstellung

Immer mehr Ottomotoren verfügen über ein System zur Nockenwellenverstellung – entweder nur auf der Einlass- oder auf Einlass- und Auslassseite. Vor kurzem ging erstmals ein Großserien-Dieselmotor mit einem Verstellsystem an einer Nockenwelle in Produktion. Durchgesetzt haben sich die Systeme mit hydraulisch betätigten Schwenkmotoren. Der Trend zum Downsizing und Downspeeding wird die Einbaurate weiter erhöhen, weil durch die relative Winkelveränderung der Lage von Nocken- zur Kurbelwelle Leistung und Drehmoment gesteigert und die Rohemissionen gesenkt werden können.

Aus technischer Sicht optimal sind elektrische Versteller. Ein elektrisches System erlaubt den höchsten Freiheitsgrad bei der Wahl der Startsteuerzeit. Es bietet eine höhere Steifigkeit bei Drehmomentbeaufschlagung zwischen Antriebsrad und Nockenwelle und erzielt daher die höchste Verstellgenauigkeit. Auch die Verstellgeschwindigkeit ist noch einmal höher als bei den besten hydraulischen Systemen. Zudem bietet das elektrische System als einziges die Möglichkeit, die Steuerzeit beim Motorstart frei zu wählen. Bei Schaeffler geht ein solches System erstmals ab 2015 in Serie. Es ist so konzipiert, dass keine Änderungen am Zylinderkopf notwendig sind.

Der hohen Leistungsfähigkeit elektrischer Phasenversteller steht allerdings auch ein erhöhter Aufwand gegenüber. Deshalb ist es sinnvoll, die bisher eingesetzten Systeme weiter zu optimieren. Die Weiterentwicklung muss darauf ausgerichtet sein, bei vergleichsweise niedrigem Öldruck den weiter steigenden Anforderungen zu genügen. Wie dies gelingen kann, ist in einem separaten Beitrag dargestellt [1].

Variabler Hubverlauf

Bei Ottomotoren sind seit vielen Jahren die stufenweise variablen Ventiltriebe auf Ein- und Auslassseite bekannt. Vor wenigen Monaten ging ein Dieselmotor mit Hubumschaltung, appliziert auf der Auslassseite, in Großserie.

Wenn die stufenweise variablen Ventiltriebsysteme mit Wirkort an der Nocke ausgeführt sind, handelt es sich um eine sogenannte Schiebenocke. Dabei wird ein auf der Nockenwelle angebrachtes Nockenpaket mittels eines elektromagnetisch betriebenen Aktuators axial verschoben. Vorteilhaft ist hierbei die Unabhängigkeit vom Hydraulikkreislauf des Motors und dessen Temperatur- bzw. Viskositätsabhängigkeit.

In vielen verschiedenen Ausführungsformen ist die Ventilkonturumschaltung am Nockengegenläufer oder am hydraulischen Abstützelement bekannt. Hier sorgt ein hydraulisch bewegter Verriegelungskolben für die Umschaltung zwischen den Ventilhubkurven.

Mit den teilvariablen Ventiltrieben lassen sich sowohl die Hubkonturumschaltung als auch die Ventilstillsetzung bzw. Zylinderabschaltung realisieren. Diese Systeme haben den Charme, bei moderatem Kostenaufwand durchaus gute Verbrauchsvorteile zu bieten.

Seit längerem besteht der Wunsch der Motorenentwickler, auch den Hub von Einlass- und sogar Auslassventilen regeln zu können. Ideal wäre eine auf den jeweiligen Motorbetriebspunkt und -zustand angepasste, frei gestaltbare Ventilerhebungskurve. Sie würde ermöglichen, die Steuerzeiten nicht als Kompromiss zwischen den divergierenden Anforderungen einzelner Teilziele auszulegen.

Schaeffler hat im Jahr 2009 gemeinsam mit Fiat das elektrohydraulische Ventiltriebssystem UniAir in Serie gebracht, dessen Aufbau und Funktion vielfach beschrieben wurde [2-4]. Der Lieferumfang von Schaeffler umfasst dabei:

- das elektrohydraulische Aktuator-Modul
- die für die Ansteuerung der Ventilsteuerung notwendige Software, die in die Motorsteuerung des Kunden integriert wird
- einen Kalibrierungsdatensatz für die jeweilige Applikation.

Dieses System wurde seither an verschiedene Serienmotoren mit Hubräumen zwischen 0,9 und 2,4 l angepasst und mehr als 500.000 mal an Kunden in Europa und Nord- und Südamerika ausgeliefert.

Entwicklungsstand UniAir

Die Grundfunktion des UniAir-Ventiltriebs hat sich seit der Markteinführung nicht verändert. Bild 1 zeigt einen typischen Aufbau. Die Nockenwelle wirkt auf einen Schlepphebel, der eine Pumpe (4) antreibt, die einen Hochdruckraum (6) befüllt. Je nach Stellung des Magnetventils (5) wirkt der Öldruck über einen Kolben auf das Motorventil oder wird durch Abfluss in den Mitteldruckraum (3) und Druckspeicher (1) gemindert. Über die Verstellung des Magnetventils können – zeitlich von der Nockenwellenstellung entkoppelt – verschiedene Druckniveaus in der Hochdruckkammer und damit variable Hübe des Motorventils realisiert werden. Der maximale Druck in der Hochdruckkammer beträgt bei heutigen Anwendungen zirka 150 bar im Dauerbetrieb. Die kurzzeitig ertragbaren Spitzendrücke erreichen die

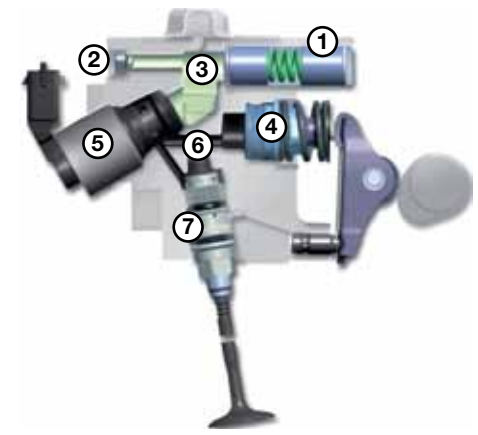

Bild 1 Typischer Aufbau eines UniAir-Aktuators mit den Komponenten:
1 – Druckspeicher
2 – Ölversorgung
3 – Mitteldruckkammer
4 – Ölpumpe
5 – Magnetventil
6 – Hochdruckkammer
7 – Ventilbremse

200-bar-Grenze. Aus energetischen Gründen fließt ein Teil des Öls aus der Mitteldruckkammer in einen Druckspeicher (1). Die Ölversorgung (2) erfolgt über den Motorölkreislauf.

Das Schließen des Motorventils erfolgt durch die Ventilfeder nach Abfall des Drucks in der Hochdruckkammer. Die Kolbenführung des für die Ventilöffnung verantwortlichen Kolbens ist mit kleinen Bohrungen versehen, die einen kontrollierten Abfluss des Öls ermöglichen und dadurch als Bremse (7) wirken.

Als weitere zusätzliche Komponente ist ein Temperatursensor notwendig, um die durch die temperaturabhängige Viskosität des Öls entstehenden hydraulischen Einflüsse kompensieren zu können. Alle anderen für die UniAir-Steuerung notwendigen Parameter – wie zum Beispiel die Nockenwellendrehzahl – werden von ohnehin verwendeten Sensoren bereitgestellt.

Die Anwendung des UniAir-Systems ist dabei nicht auf Motoren mit einem Einlassventil je Zylinder beschränkt. Zwei Einlassventile des gleichen Zylinders können entweder über individuelle Betätigung oder über eine hydraulische oder mechanische Brücke angesteuert werden (Bild 2). Momentan ist aus Kostengründen nur die Variante mit hydraulischer Brücke in Serie. Eine Einzelansteuerung würde demgegenüber eine noch höhere Flexibilität ermöglichen.

Mit den heute bereits in Serie verbauten Systemen kann bereits eine erhebliche Variabilität des Ventilhubs sowie der Öffnungszeiten erreicht werden (Bild 3). Den Maximalhub sowie den frühesten Öffnungszeitpunkt gibt die Hüllkurve des für den Antrieb verwendeten Nockens vor. Dies gilt analog für den spätesten Schließzeitpunkt. Die Regelung in diesen Grenzen erfolgt ausschließlich über die Bestromung des Schaltventils.

Der für das Schließen des Magnetventils – also das Öffnen des Motorventils – benötigte Stromverlauf weist während der Schließzeit einen typischen V-förmigen Verlauf auf, der durch das Anschlagen des Ventils in der Endstellung hervorgerufen wird. Die Lage des Umkehrpunktes im

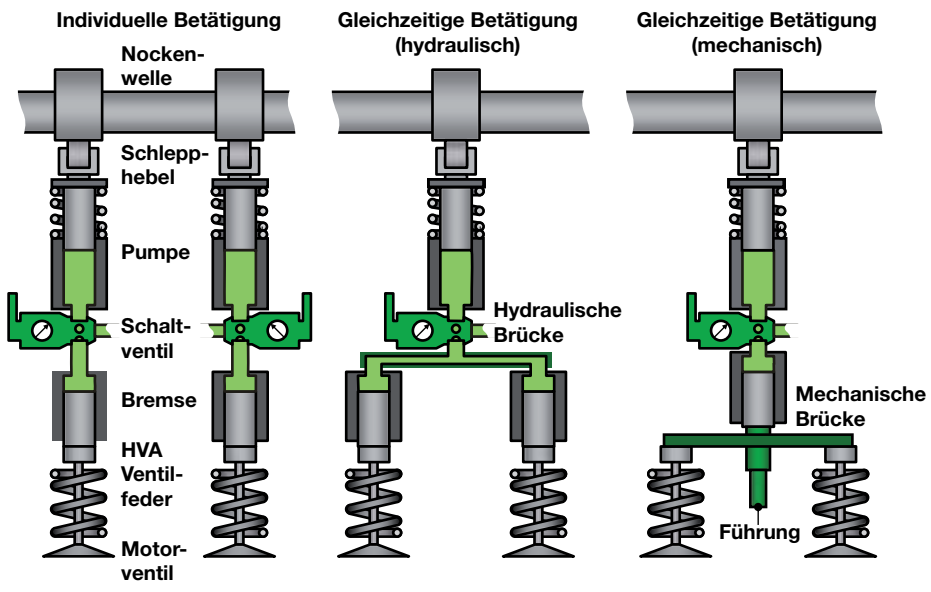

Bild 2 Alternativen zur Betätigung zweier Einlassventile

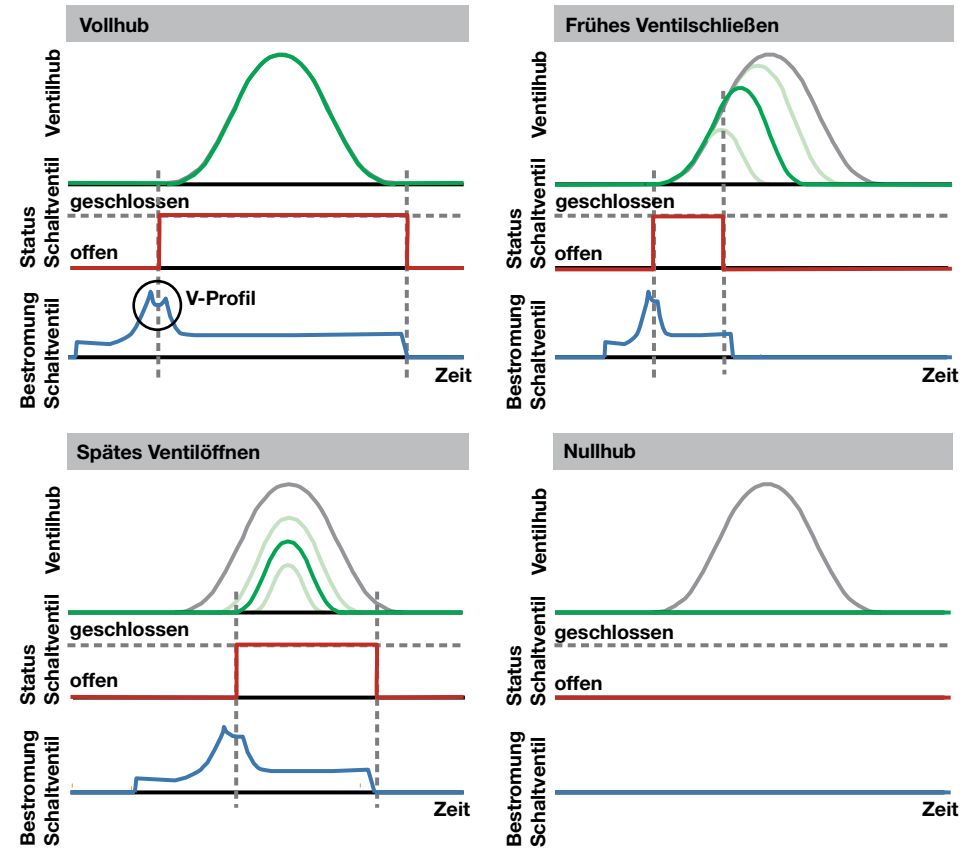

Bild 3 Variabilität Ventilhub und Öffnungs-/Schließzeitpunkt mit aktuellem UniAir-System

V-Profil gibt Aufschluss darüber, inwieweit der gewünschte Hub des Magnetventils erreicht wurde. Werden mehrere aufeinander folgende Ereignisse miteinander verglichen, so ist eine Verfolgung der Reproduzierbarkeit möglich. Kommt es, beispielsweise aufgrund von alternden Komponenten, dabei zu nicht tolerierbaren Abweichungen, können diese durch Veränderung des Bestromungsverlaufes kompensiert werden.

Die bisherigen Erfahrungen mit den Serienmotoren zeigen, dass UniAir sowohl bei der Reproduzierbarkeit – also Abweichungen von Zyklus zu Zyklus in einem Zylinder – als auch bei der Systempräzision – Streuung über mehrere Motoren – sehr gute Werte aufweist. So erreicht UniAir für die Funktion „Frühes Einlassschließen“ eine Wiederholgenauigkeit von 0,4 Grad Kurbelwelle (°KW) bei 3.000 min^{-1} und einer Systemtemperatur von 120 °C. Der Öffnungswinkel bei „Spätem Einlassöffnen“ – entscheidend für die Zylindergleichstellung – erreicht ebenfalls eine Genauigkeit von 0,4 °KW. Die Abweichungen zwischen verschiedenen Serienmotoren bewegen sich für „Frühes Einlassschließen“ unter den genannten Bedingungen auf etwas höherem Niveau als für die Einzelzylinderaktuierung. Allerdings

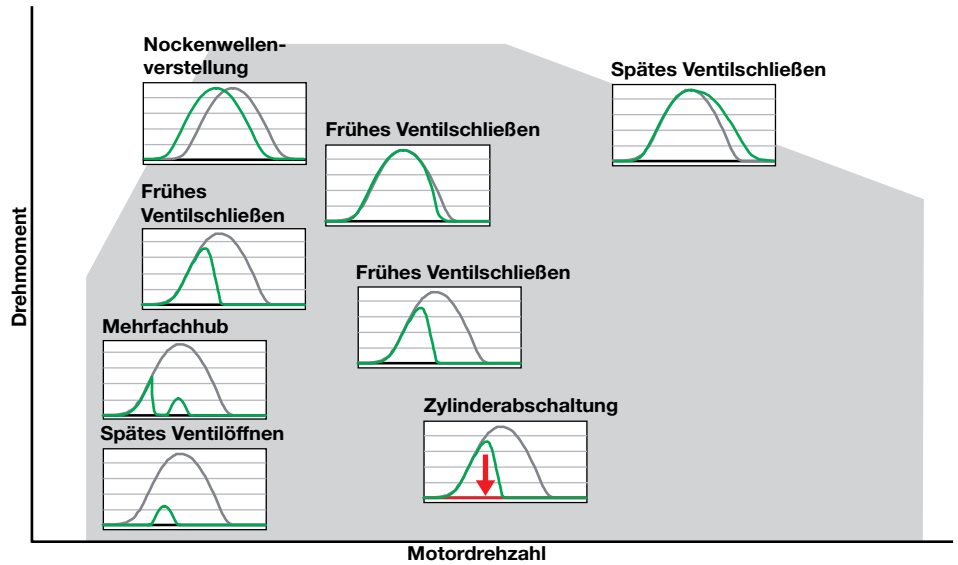

Bild 4 Ventilhubverläufe im Motorkennfeld

sorgt auch hier eine in der UniAir-Software integrierte Kompensationsfunktion für eine entsprechende Gleichstellung zwischen den Zylindern eines Motors.

In Summe ergibt sich die Möglichkeit einer für alle Motorbetriebspunkte optimalen Einstellbarkeit von Ventilöffnungs- und -schließzeiten sowie der Ventilhübe (Bild 4).

Die Markteinführung von UniAir hat bewiesen, dass eine bauraumneutrale Applikation des Systems möglich ist. Die Voraussetzung dafür ist, dass der Antrieb des UniAir-Systems und des verbleibenden Standardventiltriebes über eine gemeinsame verbleibende Nockenwelle erfolgt. Bei einem Direkteinspritzer-Ottomotor ist bei zentraler Injektorlage dafür eine Anordnung des Injektors und der Zündkerze quer zur Nockenwellenrichtung vorzusehen. Gelingt dies, kann beispielsweise die Einlass-Nockenwelle entfallen, dann können die Mehrkosten des UniAir-Systems teilweise kompensiert werden. Es wird zukünftig jedoch auch Anwendungen geben, in denen beide Nockenwellen erhalten bleiben.

Erweiterung des Funktionsumfangs

Anwendungen für Ottomotoren

Der Trend zu verbrauchsgünstigen Ottomotoren mit Direkteinspritzung und immer kleineren Hubräumen hält unvermindert an. Durch die Einführung neuer Normzyklen für die Verbrauchsmessung, insbesondere des WLTP (Worldwide harmonized Light Test Procedure), werden gleichzeitig Betriebspunkte mit höherer Last angefahren, in denen sich die Vorteile der Kombination von Downsizing und Turboaufladung nicht im gleichen Maß ausspielen lassen. Ein vollvariabler Ventiltrieb kann daher in Verbindung mit der Aufladung zu einer weiteren Verbrauchssenkung beitragen.

Das Durchspülen des Zylinders mit Frischluft („Scavenging“) sorgt bei einem aufgeladenen Motor für deutlich spontaneres Ansprechverhalten bei niedrigen Drehzahlen und hoher Last. Die dafür notwendige Ventilüberschneidung wird traditionell durch den Einsatz von Nockenwellen-Phasenverstellern erreicht. Schaeffler bietet solche Phasenversteller an, die sich durch hohe Verstellgeschwindigkeit auszeichnen [4]. Bei richtiger Auslegung kann UniAir einen solchen Phasenversteller größtenteils ersetzen. Zwar kann mit dem System nicht der zeitliche Beginn der Ventilhüllkurve beeinflusst werden, jedoch kann durch die Variation des Öffnungszeitpunkts in Verbindung mit einer speziellen Hubkurve (Bild 8) Ventilüberschneidung nur dann aktiviert werden, wenn diese benötigt wird.

Die Entdrosselung bei niedrigen Drehzahlen hat bekanntlich eine sehr positive Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch. Wichtig ist dabei, dass die kleineren Ventilhübe nicht so gestaltet sind, dass während des Ansaugtaktes der Unterdruck im Zylinder steigt, der zur Erhöhung der Ladungswechselverlusten führt. Das spricht für Systeme, bei denen die Hubhöhe und die Hubdauer gleichermaßen variiert werden können (Bild 5). Verglichen mit einem Motor, der mit Standardventiltrieb und Nockenwellenverstellern betrieben wurde, ergibt sich im Betriebspunkt 2.000 min^{-1} und 2 bar eine durch Messungen nachgewiesene Verminderung des spezifischen Verbrauchs um 8,4 %.

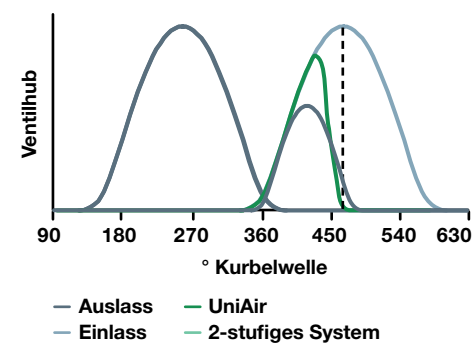

Bild 5 Hubverläufe zur Entdrosselung bei niedrigen Drehzahlen: UniAir im Vergleich mit einem zweistufigen Nockenprofil

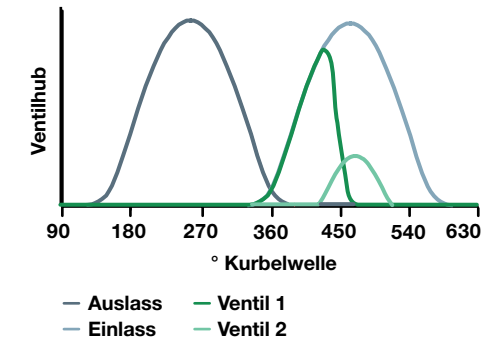

Bild 6 Hubverläufe zweier Einlassventile eines Zylinders bei individueller Ansteuerung

Insbesondere bei niedrigen Lasten, wie sie für den Stadtverkehr typisch sind, kann eine Erhöhung der Ladungsbewegung im Zylinder („Swirl“) zu einer besseren Gemischbildung und damit einer effizienteren Verbrennung beitragen. Werden die beiden Einlassventile eines Zylinders durch ein UniAir-System individuell angesteuert, so können individuelle Hubprofile für die Ventile dargestellt werden (Bild 6).

Für den Stadtverkehr beziehungsweise den Niedriglastbetrieb sind zudem Ventilhubverläufe in Entwicklung (Bild 7), die nur mit UniAir, nicht aber mit mechanischen Lösungen für einen vollvariablen Ventiltrieb darstellbar sind. Die Funktion „Hybridlift“ kombi-

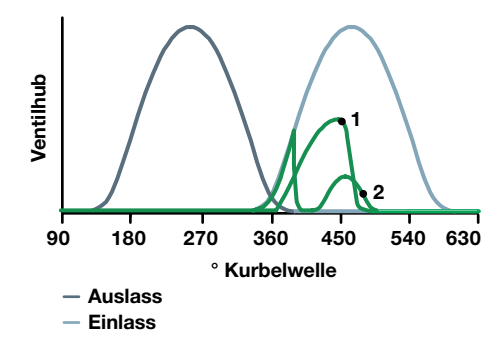

Bild 7 Spezielle Ventilhubverläufe: 1) Hybridlift und 2) Multilift

niert spätes Öffnen des Einlassventils mit einem frühen Schließen, wobei die Rampen zueinander nicht symmetrisch sind.

Die Funktion „Multilift“ öffnet und schließt das Einlassventil innerhalb des Ansaugtaktes zweimal, was bei niedriger Drehzahl und niedriger bis mittlerer Last zu einem optimalen Brennverlauf und niedrigen Pumpverlusten führt. Sie eignet sich daher besonders für Verbrauchsoptimierung im urbanen Verkehr.

Bei mittleren Lasten bietet sich der Betrieb mit dem Miller-Verfahren – also vorgezogenem und raschem Schließen des Einlassventils – an. Durch das bessere Expansionsverhältnis verbessert sich der Wirkungsgrad des Motors. Das „Millern“ ist mit UniAir problemlos möglich. Gleiches gilt für den Betrieb im Atkinson-Verfahren bei hoher Last durch längeres Öffnen des Einlassventils. Dies führt zu der gewünschten Verringerung der Verdichtung, ohne die Ladungsbewegung im Zylinder zu zerstören. Die geringere Verdichtung im Hochlastbereich verringert die Klopfneigung erheblich, was für moderne hochaufgeladene Ottomotoren relevant ist.

Die Applikationstauglichkeit einer Kombination von Miller- und Atkinson-Verfahren, die allein durch UniAir gesteuert wird, haben Continental und Schaeffler in einem gemeinsamen Vorentwicklungsprojekt untersucht. Dafür wurde ein ohnehin mit UniAir ausgerüsteter 1,4-l-Serienmotor nur durch Änderung der Motorsteuerung auf eine entsprechende Prozessführung hin optimiert. Die Ergebnisse zeigen erhebliche Verbrauchspotenziale:

- Im Betriebspunkt 2.000 min^{-1} und 12 bar verringert der Einsatz des Miller-Verfahrens die Verdichtung, was zu geringeren Verdichtungsendtemperaturen und damit zu reduzierter Klopfneigung führt. Der spezifische Verbrauch verbessert sich um 4,4 % gegenüber dem Serienmotor.
- Wird der Mitteldruck bei identischer Drehzahl auf 15 bar gesteigert, ist durch das Schließen des Einlassventils nach Beginn des Verdichtungstaktes (Atkinson-Zyklus) eine deutlich geringere Klopfneigung zu beobachten. Der spezifische Verbrauch verringert sich um 4,6 %.
- In einem typischen Volllastpunkt (3.000 min^{-1} und 18 bar) ist es durch den Einsatz des Atkinson-Verfahrens möglich, die Anfettung zurückzunehmen, die ansonsten notwendig wäre, um die Temperatur im Brennraum zu verringern. Dies führt zu einer Reduktion des spezifischen Verbrauchs um 4,6 %.

Nicht nur der Verbrauch, sondern auch die Abgasemissionen können durch den Einsatz von UniAir gemindert werden. Dies gilt insbesondere für Stickoxide (NO_X), wie für einen Dieselmotor bereits 2008 nachgewiesen werden konnte [6]. Bei entsprechenden Konzepten wurden motorinterne und externe (Niederdruck-)Abgasrückführung (AGR) kombiniert.

Mit dem bisherigen UniAir-System der ersten Generation konnte die Verstellung des Ventilhubes nur innerhalb der durch den Nocken vorgegebenen „konventionellen“ Hüllkurve erfolgen. Dies macht die Realisierung großer Ventilüberschneidungen, wie sie für hohe Restgasgehalte notwendig ist, schwierig bis unmöglich. Mit der Einführung eines entsprechend gestalteten „zweistufigen“ Nockenprofils für den UniAir-Antrieb ist dieses

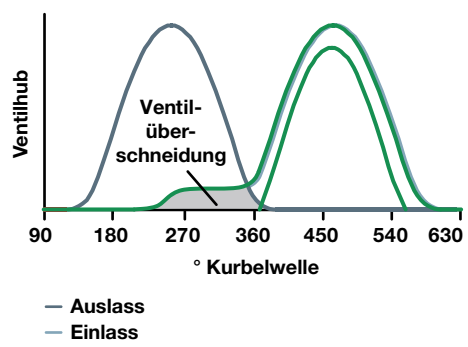

Bild 8 Ventilüberschneidung für interne AGR mit zweistufigem Nocken als UniAir-Antrieb

Hindernis überwunden. Wegen seiner spezifischen Form spricht man von einem „Bootnocken“. Erstmals kann nun eine große Ventilüberschneidung realisiert werden, ohne die maximale Füllung während des Einlasstaktes deutlich zu reduzieren (Bild 8).

Für Betriebspunkte, zum Beispiel an der Volllast, die eine interne Abgasrückführung nicht benötigen, wird das für die UniAir-Schaltung verantwortliche Schaltventil erst bestromt, wenn die erste Stufe des Nockens die Kontaktfläche zur Hochdruckpumpe bereits durchlaufen hat.

UniAir für Dieselmotoren

Bei der Weiterentwicklung des Dieselmotors steht in den kommenden Jahren weiterhin die Verminderung der Abgasschadstoffe NO_X und Ruß im Vordergrund. Um den Aufwand für die kostenintensive Abgasnachbehandlung, vor allem die selektive katalytische Reduktion (SCR), möglichst gering zu halten, ist eine saubere Verbrennung erste Wahl für jeden Motorenentwickler. Neben anderen Maßnahmen wie der Erhöhung des Einspritzdrucks ist eine Verbrennung mit hohen AGR-Raten eine wichtige Voraussetzung, um diese Motorrohemissionen klein zu halten.

Der zweistufige Nocken ist für den Dieselmotor keine geeignete Lösung, da eine signifikante Ventilüberschneidung an dem

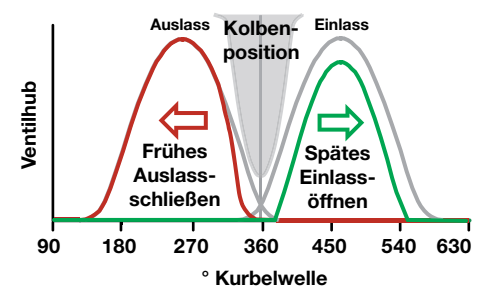

Bild 9 Interne AGR für Dieselmotoren durch frühes Auslassschließen und spätes Einlassöffnen

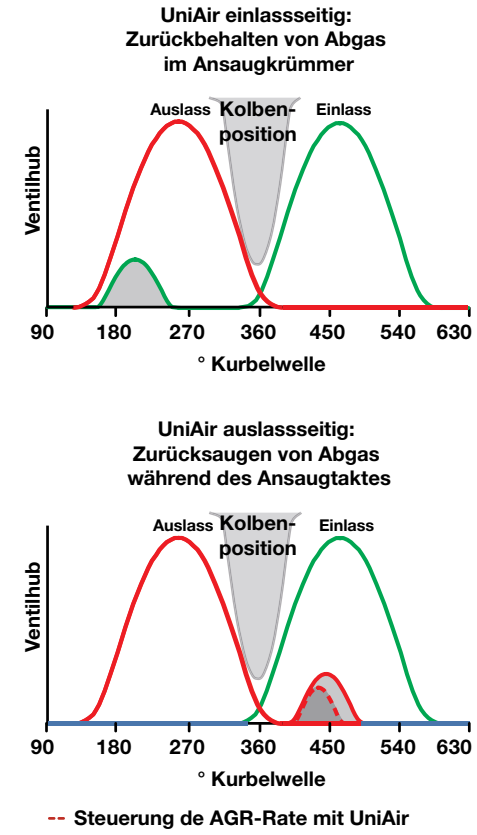

Bild 10 Interne AGR für Dieselmotoren mit Doppelnocken für den UniAir-Antrieb

mangelnden Freigang zwischen Kolbenboden und Motorventil im oberen Totpunkt scheitert. Ein alternatives Konzept wäre durch frühes Schließen des Auslassventils und spätes Öffnen des Einlassventils in weiten Grenzen die Menge des im Brennraum verbleibenden Restgases zu steuern (Bild 9). Die dafür erforderliche Variabilität des Hubverlaufes bietet bereits das UniAir-System der ersten Generation – allerdings muss in diesem Fall UniAir auch auf der Auslassseite eingesetzt werden.

Eine weitere Lösung, um gegebenenfalls noch höhere interne AGR-Raten zu erzielen, stellen Doppelnocken auf der Einlass- oder Auslassseite für den UniAir-An-

trieb dar. Dabei ist sichergestellt, dass auch die Ventilerhebungskurve des kleineren Nockens gesteuert werden kann (Bild 10), und so eine Steuerung der AGR-Rate möglich wird. Alle Modi des UniAir-Systems bleiben für den Primär-/Haupt-Nocken auch weiterhin fahrbar. So ist jederzeit auch ein Betrieb ohne AGR möglich, was beispielsweise bei extrem niedrigen Temperaturen (weniger als -10 °C) wichtig ist.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass die thermodynamisch positiven Effekte eines mittels Miller-/Atkinson-Verfahren verringerten effektiven Verdichtungsverhältnisses mit UniAir für den Dieselmotor genauso zu erschließen sind [1]. Allerdings wird hierbei darauf abgezielt, die Verdichtungsendtemperatur und damit die maximale Verbrennungsendtemperatur aus Emissionsgründen zu reduzieren.

Unterstützung künftiger Brennverfahren

Zylinderabschaltung

Trotz des unverkennbaren Trends zu hochaufgeladenen Motoren mit geringen Hubräumen werden für leistungsorientierte und große Fahrzeuge auch künftig Motoren mit vier und mehr Zylindern zum Einsatz kommen. Solche Motoren müssen vor allem in Bereichen niedriger Last und kleiner bis mittlerer Drehzahl bessere spezifische Verbräuche erreichen, damit die Gesamtemission des Fahrzeugs in den gängigen Normzyklen sinkt. Eine unter anderem bei Audi, Chrysler, GM, Honda, Mercedes und Volkswagen bereits in Serie eingeführte Lösung dafür ist die Zylinderabschaltung,

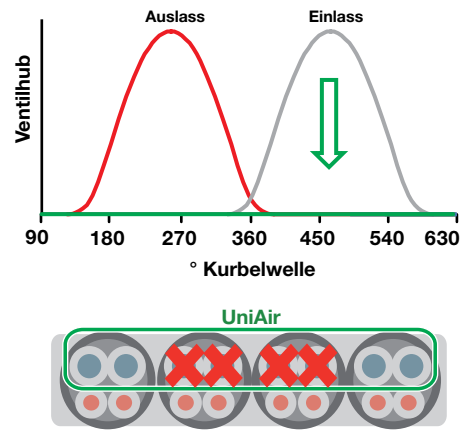

Bild 11 Zylinderabschaltung durch Stilllegen des Einlassventils

die den Betriebspunkt der nicht abgeschalteten Zylinder zu höheren Lasten hin verschiebt. Die dafür eingeführten mechanischen Systeme sind mit erheblichem Aufwand verbunden.

Eine einfache Zylinderabschaltung kann bereits mit dem heutigen UniAir-System realisiert werden (Bild 11). Allerdings erschließt ein solches System nicht das volle CO_2-Minderungspotenzial der heuti-

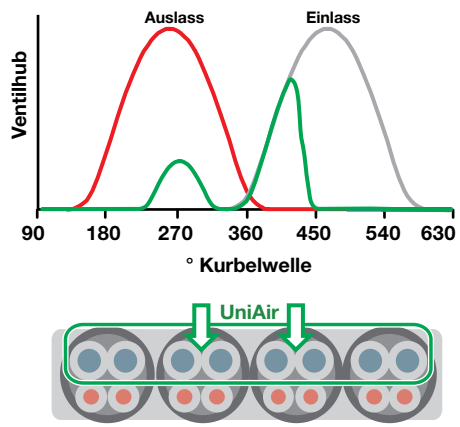

Bild 12 Zylinderabschaltung mit zusätzlichem Einlassöffnen

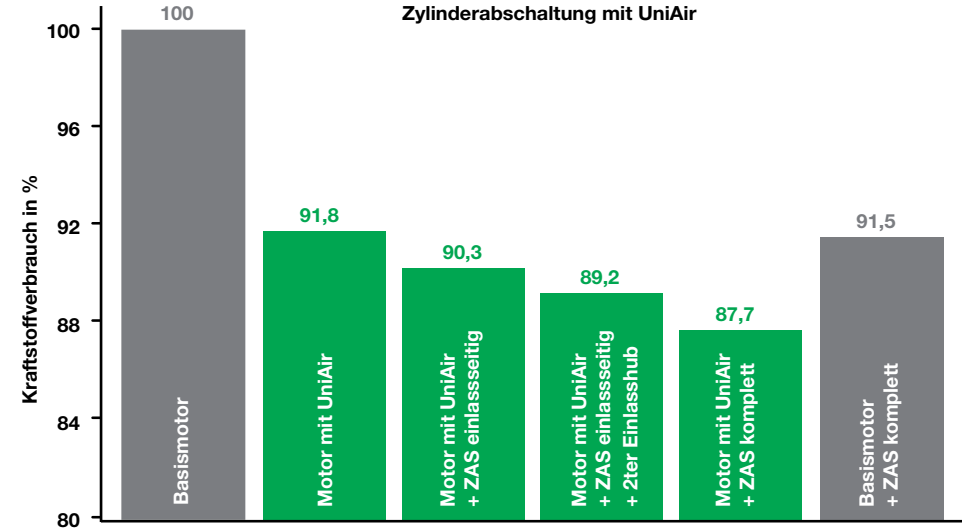

Bild 13 Simulierte Verbrauchsvorteile für unterschiedliche Strategien zur Zylinderabschaltung

gen mechanischen Abschaltungen, das auf bis zu 4 % zusätzlich zur Nutzung des vollvariablen Ventiltriebes geschätzt wird. Grund hierfür ist die durch die weiterhin betätigten Auslassventile erhebliche Ladungswechselarbeit.

Sollen zusätzliche Maßnahmen an der Auslassseite, wie z. B. der Einsatz von schaltbaren Abstützelementen, vermieden werden, so gibt es auch eine weitere Variante, die ebenfalls auf dem Einsatz eines Doppelnockens basiert. Der wird in diesem Fall einlassseitig dafür eingesetzt, an einem unbefeuerten Zylinder während des Auslasstakts das Einlassventil kurz zu öffnen (Bild 12). Das Abgas kann dadurch in die Ansauganlage strömen. Während des Ansaugtakts wird dann das Einlassventil wiederum geöffnet, rasch aber wieder geschlossen, so dass hauptsächlich nur das „gelagerte“ Abgas in den Brennraum zurückströmen kann. Durch diesen Schaukeleffekt fällt die Ladungswechselarbeit in Summe deutlich geringer aus, es kann ein Großteil des Einsparpotenzials einer vollständigen Deaktivierung aller Ventile erreicht werden (Bild 13).

Homogene Kompressionszündung

Die homogene Kompressionszündung, auch bekannt als HCCI-Verfahren (Homogeneous Charge Compression Ignition) wird seit einiger Zeit zur Serienreife entwickelt. Der Kennfeldbereich, in dem die thermodynamischen Vorteile der Selbstzündung genutzt werden können, ist kontinuierlich ausgeweitet worden, deckt jedoch weiterhin nur einen Teil des Kennfeldes maximal bis zu mittleren Lasten und Drehzahlen ab. Entscheidend für eine stabile HCCI-Verbrennung ist nämlich eine Ladungsschichtung mit exakt definierter Zusammensetzung und hoher Restgasmenge. Neben der Einspritzung kann eine exakte Führung der Ladungsbewegung in Kombination mit einer exakten Beimessung der AGR-Rate und einer angepassten Verdichtung die Stabilität des Brennverfahrens deutlich positiv beeinflussen [6].

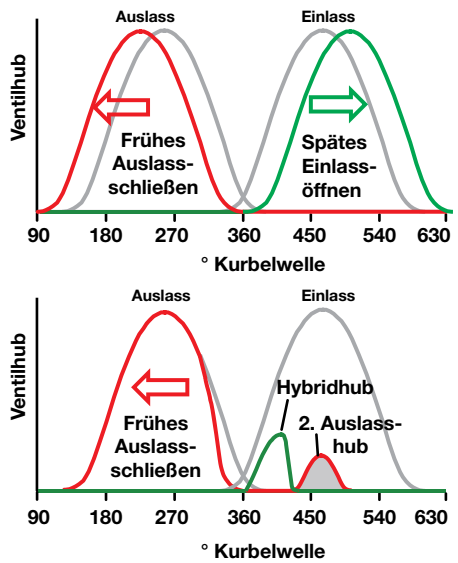

Bild 14 Ventilhubkurven für ein HCCI-Brennverfahren: Mehr Variabilität durch Kombination von Phasensteller (links) und UniAir (rechts)

Um eine entsprechende Ladungsbewegung bei hohen Drehzahlen und Lasten sicherzustellen, setzt Schaeffler auf eine Kombination aus Nockenwellen-Phasenversteller (elektromechanisch oder hydraulisch) und UniAir mit Doppelnockenantrieb (Bild 14). Durch die schnelle Aktorik kann für jeden Betriebspunkt das richtige Kompressions- und Gemischverhältnis eingestellt werden. Auch das Umschalten zwischen Kennfeldbereichen mit Kompressions- und mit Fremdzündung ist erheblich sicherer und schneller zu gestalten.

Ausblick

Das UniAir-System hat sich im Markt fest etabliert. Die erheblich höhere Flexibilität des Ventilhubverlaufes von elektrohydraulischen gegenüber mechanischen Systemen, die ebenfalls in Serie oder in Entwicklung sind, ermöglicht schon heute eine wesentlich dynamischere Prozessführung. Mit dem UniAir der zweiten Generation werden erweiterte Funktionen möglich. Die dafür notwendige Anpassung des UniAir-Antriebs durch zweistufige Nocken oder Doppelnocken hat einen hohen Reifegrad erreicht.

Ab 2015/16 kommen weitere Pkw-Applikationen von UniAir hinzu, darunter Motoren mit abweichenden Zylinderzahlen zu den heutigen Serienapplikationen. Der Serienanlauf bei weiteren Automobilherstellern steht bevor. Mit einer Applikation an einem Vierzylinder-Dieselmotor wird derzeit eine intensive Vorserienerprobung durchgeführt.

In naher Zukunft wird es zudem erste Motorräder geben, die das UniAir-System an Bord haben. Parallel arbeitet Schaeffler in einer Partnerschaft mit ABB-Turbosystems daran, das UniAir-System auch für Stationärmotoren zu vermarkten. Besonders interessant ist hier der Gasbetrieb von Stationärmotoren zur Energieerzeugung. Auch solche Motoren müssen künftig wesentlich flexibler geregelt werden, ohne dass der hohe Wirkungsgrad leiden soll. Die Einsparungen durch den erzielten Verbrauchsvorteil sind dabei deutlich höher als die Kosten des variablen Ventiltriebsystems.

Literatur

[1] Dietz, J.; Busse, M.; Räcklebe, S.: Smart Phasing: Bedarfsgerechte Konzepte für Nockenwellen-Verstellsysteme. 10. Schaeffler Kolloquium, 2014

[2] Haas, M.: Einfach Luft? UniAir – die erste vollvariable, elektrohydraulische Ventilsteuerung. 9. Schaeffler Kolloquium, 2010

[3] Bernard, L.; et al: Elektrohydraulische Ventilsteuerung mit dem „MultiAir“-Verfahren. MTZ 70, 2009, Nr. 12, S. 892-899

[4] Haas, M.; Rauch, M.: Elektrohydraulischer Vollvariabler Ventiltrieb. MTZ 71, 2010, Nr. 3, S. 160-165

[5] Ruggiero, A. et al.: Combustion Technologies to meet EURO 6 Emission Standard on Diesel D-segment Passenger Car. SIA International Conference „Diesel Engine: the low CO_2 and emission Reduction Challenge“, Rouen, 2008

[6] Schutting, E.; et al.: Miller- und Atkinson-Zyklus am aufgeladenen Dieselmotor. MTZ 68, 2007, Nr. 6, S. 480-485