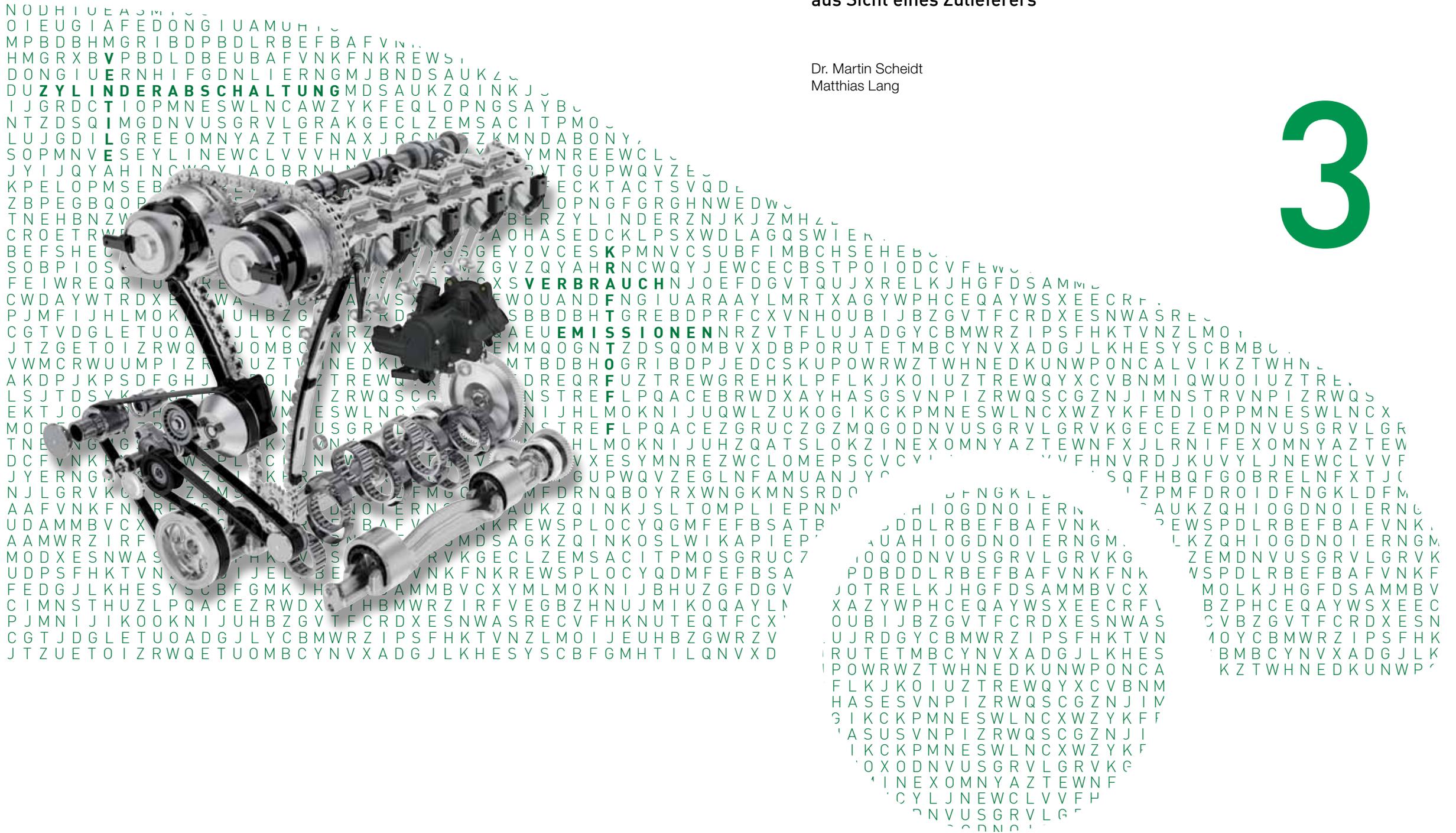


Effizienz pur

Die Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors aus Sicht eines Zulieferers

Dr. Martin Scheidt
Matthias Lang

3



Effizienz als primäres Entwicklungsziel

Ende 2013 hat sich die Europäische Union auf neue CO₂-Grenzwerte geeinigt. Ab dem Jahr 2020 gilt ein Flottenemissionswert von 95 g CO₂/km. Das entspricht einem Verbrauch von etwa 3,6 l/100 km für Diesel- und 4,1 l/100 km für Benzinfahrzeuge. Diese Grenzwerte werden die weltweit strengsten darstellen. Es ist zu erwarten, dass die Erreichung des Grenzwertes bei in etwa identischem Fahrzeugmix für die Anbieter von Premium-Automobilen nur möglich sein wird, indem große und schwere Fahrzeuge teilelektrifiziert werden. Hierbei wird der Plug-in-Hybridantrieb eine besondere Rolle spielen, da er durch die geltende Gesetzgebung begünstigt wird.

Trotz der zunehmenden Elektrifizierung ist aus mehreren Gründen die Optimierung des Verbrennungsmotors eine Aufgabe, die Ingenieure in der gesamten Automobilindustrie auf viele Jahre hin beschäftigen wird. Der wichtigste Grund besteht in dem enormen Wachstum, das die Automobilindustrie in den kommenden Jahren weltweit erwarten darf. Mit zunehmendem Wohlstand wird die Anzahl der neu zugelassenen Pkw und leichten Nutzfahrzeuge bis 2020 auf etwa 105 Millionen Einheiten anwachsen, das entspricht gegenüber 2012 einem Wachstum von 40 % [1]. Der Zuwachs entfällt im Wesentlichen auf Schwellenländer sowie die jungen

Industrienationen Brasilien, Russland, China und Indien. Gerade dort sind aber für viele Menschen, die erstmals ein eigenes Automobil erwerben, die mit einer Elektrifizierung des Antriebs verbundenen Kosten nicht tragbar. In solchen Märkten werden daher besonders jene Automobilhersteller Erfolg haben, die durch effiziente Verbrennungsmotoren den Einsatz elektrischer Antriebskomponenten möglichst weit hin zu schweren Fahrzeugen verschieben können.

Der zweite, für die entwickelten Märkte, wie Europa und die USA, wesentliche Grund ist die Erwartung des Autokäufers, dass die Normverbräuche auch in der Praxis annähernd erreicht werden. Bei Plug-in-Hybriden gilt dies insbesondere, wenn die gefahrenen Strecken deutlich über die elektrische Reichweite hinausgehen und das Fahrzeug den elektrischen Teil des Antriebs und die Batterie als Zusatzgewicht tragen muss. So wird von Volkswagen für die 2014 einzuführende Plug-in-Variante des Golf ein Mehrgewicht von 250 kg gegenüber einem vergleichbaren Benziner genannt. Ein effizienter Verbrennungsmotor mit hoher Leistungsdichte kann dazu beitragen, diese Endkundenerwartungen zu erfüllen.

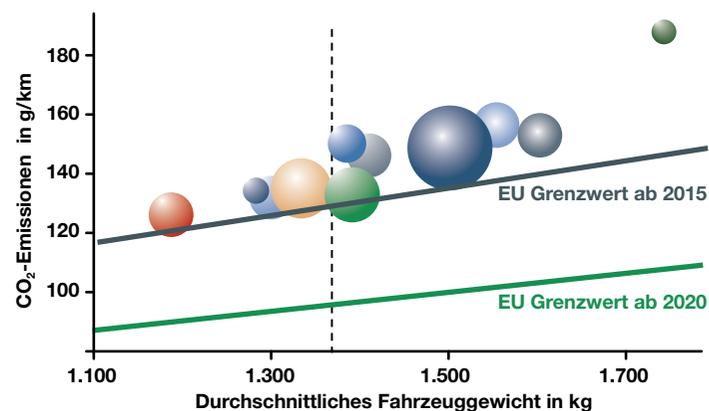
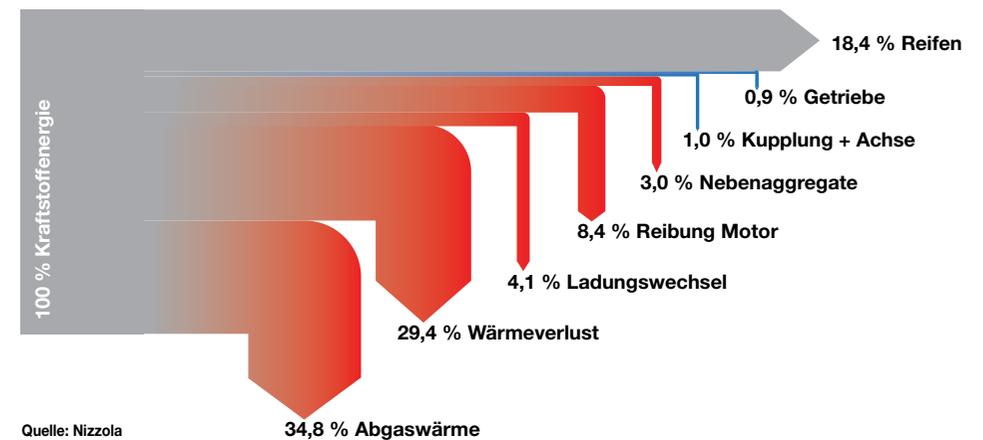


Bild 1 CO₂-Flottenverbräuche von in der EU verkauften Fahrzeugen



Quelle: Nizzola

Bild 2 Typische Verlustleistungen auf der Wirkungsgradkette vom Tank zum Rad

Schließlich ist festzuhalten, dass die europäischen CO₂-Grenzwerte zwar besonders streng sind, jedoch die Gesetzgebung international mit einiger Verzögerung auf ähnliche Werte zuläuft (siehe Bild 2 in [2]). Aus Sicht eines europäischen Zulieferers ergibt sich daraus die Möglichkeit, im heimischen Markt verbrauchsmindernde Technologien frühzeitig in den Markt zu bringen und damit international einen Wettbewerbsvorteil zu erlangen.

Die EU-Grenzwerte von 130 g CO₂/km für 2015 bzw. 95 g CO₂/km beziehen sich jeweils auf ein Fahrzeuggewicht von 1.372 kg. Die Grenzwerte für Fahrzeuge mit davon abweichendem Gewicht ergeben sich daraus linear über einen Gewichtungsfaktor. Wie sich Bild 1 entnehmen lässt, erfüllt aktuell kein Hersteller in der EU den Grenzwert, der ab 2015 gilt. Nur Teile der Flotten einzelner Hersteller erreichen heute schon die Grenzwerte. Zusätzlich zu dem schärferen Grenzwert, der ab 2020 gilt, wird außerdem der Gewichtungsfaktor reduziert, was speziell für Hersteller schwererer Fahrzeuge nachteilig ist. Insgesamt zeigt sich, dass alle Hersteller große Anstrengungen zur Effizienzsteigerung ihrer Fahrzeugflotten unternehmen müssen.

Der Ansatz zur Effizienzsteigerung

Eine höhere Effizienz des Verbrennungsmotors ist nur zu erreichen, wenn der reale Motor dem thermodynamisch möglichen Optimum möglichst nahe kommt. Daher muss sich der Ingenieur vorrangig mit den im realen Motor auftretenden Verlusten beschäftigen. Bild 2 zeigt einen typischen Zyklus, in dem die Aerodynamik des Fahrzeuges nicht berücksichtigt wird.

Für den Norm- wie für den Realverbrauch spielen bei modernen Antriebskonzepten zudem einzelne Betriebszustände des Motors eine wichtige Rolle. Dies gilt für instationäre Zustände wie stärkere Beschleunigungen, bei denen Motoren mit hoher Leistungsdichte und geringen Hubräumen relativ hohe Abweichungen vom Bestpunkt aufweisen. Grund hierfür ist unter anderem die „Vollastanfettung“, die oft schon bei relativ niedrigen Drehzahlen eingesetzt werden muss, um klopfende Verbrennung zu vermeiden und die Bauteile auf der Auslassseite vor zu hohen Temperaturen zu schützen. Zu den besonders zu berücksichtigenden Betriebszuständen gehören außerdem der Motorwarmlauf

nach einem Kaltstart, aber auch immer häufiger Situationen, in denen ein Teil des Motors (Zylinderabschaltung) oder das gesamte Aggregat (Start-Stopp-Betrieb/ Segeln) stillgelegt werden.

Dazu gehört auch, dass die Effizienz moderner Motoren weder zu Lasten der Rohemissionen von Abgasschadstoffen noch zu Komfortnachteilen für den Endkunden führen darf.

Effizienzpotenziale

Um die am Verbrennungsmotor auftretenden Verluste zu minimieren, gibt es zwei Wege, die parallel gegangen werden müssen: Zum einen gilt es, den Wirkungsgrad der Verbrennung selbst zu steigern, zum anderen die Verluste, hier vor allem Reibung und Ladungswechsel, zu minimieren.

Verringerung der Ladungswechselverluste

Die Ladungswechselverluste sind stark davon abhängig, wie sehr der Motor in einem bestimmten Betriebspunkt gedrosselt werden muss. Aus einem anderen Blickwinkel betrachtet, stellt sich die Frage, wie häufig Betriebspunkte mit geringer Drosselung, also hoher Last bei geringer Drehzahl, durch die Getriebekennlinien tatsächlich anfahrbar sind.

Um einen solchen Betrieb zu ermöglichen, hat sich die Kombination von Direkteinspritzung und Abgasturboaufladung am Markt etabliert. Sie führt zu hohen spezifischen Leistungen, die für eine Hubraumverringerung („Downsizing“) genutzt werden können. Solche Motoren werden tendenziell häufiger in entdrosselten Kennfeldpunkten betrieben. Eine ähnliche Wirkung hat die Zylinderdeaktivierung, die ebenfalls zu einem höheren indizierten Mitteldruck in den weiter arbeitenden Zylindern – und damit zu einer Entdrosselung – führt.

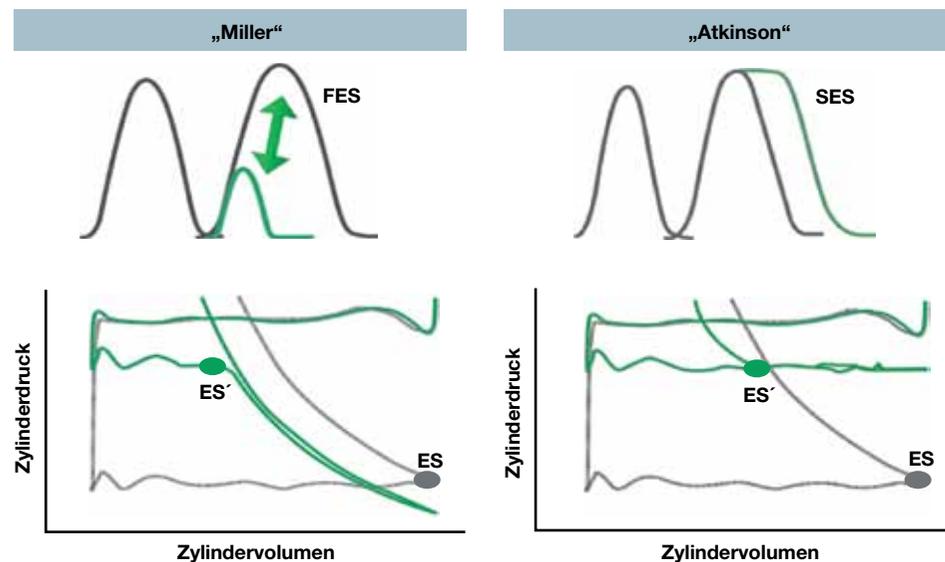


Bild 3 Entdrosselung durch veränderte Steuerzeiten der Einlassventile

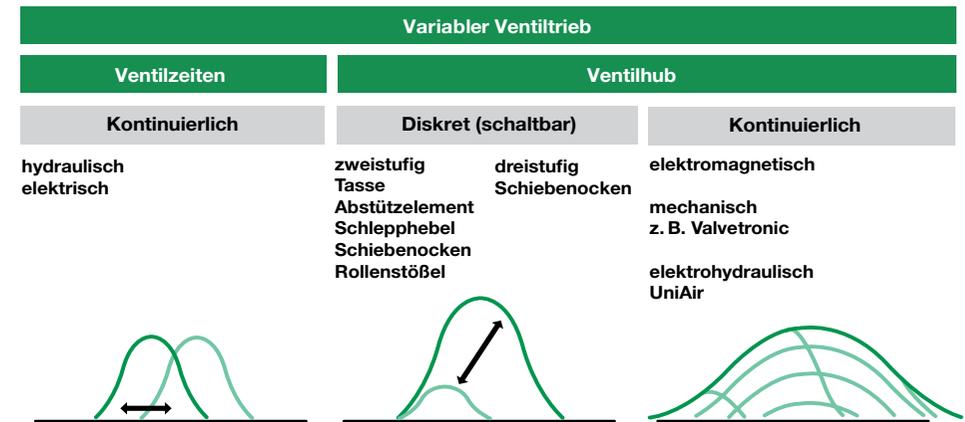


Bild 4 Verschiedene Formen der Variabilität im Ventiltrieb

Eine weitgehende Entdrosselung kann durch frühes (FES) oder spätes (SES) Schließen der Einlassventile erreicht werden. Beide Verfahren bewirken eine Verringerung der effektiven Verdichtung und sind auch als Miller- beziehungsweise Atkinson-Zyklus bekannt (Bild 3). Mit den so veränderten Ventilöffnungszeiten sind bei einem Viertaktmotor geringere Ladungswechselverluste, aber auch die Herausforderung schlechterer Entflammbarkeit verbunden. Diesem Effekt kann durch eine erhöhte Ladungsbewegung im Brennraum entgegengesteuert werden, der eine verbesserte Gemischaufbereitung und somit eine effektivere Verbrennung ermöglicht.

Um eine vollständige Entdrosselung zu erreichen, wären idealerweise sowohl die Öffnungs- und Schließzeiten als auch der Ventilhub für alle Betriebszustände frei wählbar.

Bereits heute haben sich Nockenwellen-Phasenversteller, welche lediglich eine teilweise Entdrosselung erlauben, am Markt etabliert. Weiterhin werden Elemente im Ventiltrieb zur Zylinderabschaltung eingesetzt. Vollvariable Ventiltriebe sind in mechanischer und elektrohydraulischer

Ausführung in ersten Anwendungen erhältlich (Bild 4).

Nockenwellen-Phasenverstellung

Nockenwellen-Phasenversteller werden in hohen Stückzahlen gefertigt. Durchgesetzt haben sich hydraulische Verstellsysteme, parallel wird auch an elektromechanischen Systemen gearbeitet. Letztere bieten ein Optimum an Verstellgeschwindigkeit und Variabilität (Bild 5), sind jedoch mit höheren Kosten verbunden. Deshalb arbeitet Schaeffler nicht nur auf die für 2015 geplante Serieneinführung elektromechanischer Verstellsysteme hin, sondern optimiert auch die Leistungsfähigkeit der hydraulischen Systeme permanent.

Die Verstellgeschwindigkeit von hydraulischen Nockenwellenverstellern ist maßgeblich durch die Leistungsfähigkeit des Ölkreislaufs bestimmt. Um die Antriebsleistung der Motorölpumpen zu reduzieren, wurde der Öldruck in den vergangenen Jahren konsequent abgesenkt. Der geringe Öldruck ist für die Neu- und Weiterentwicklung von Nockenwellen-Verstellsystemen eine herausfor-

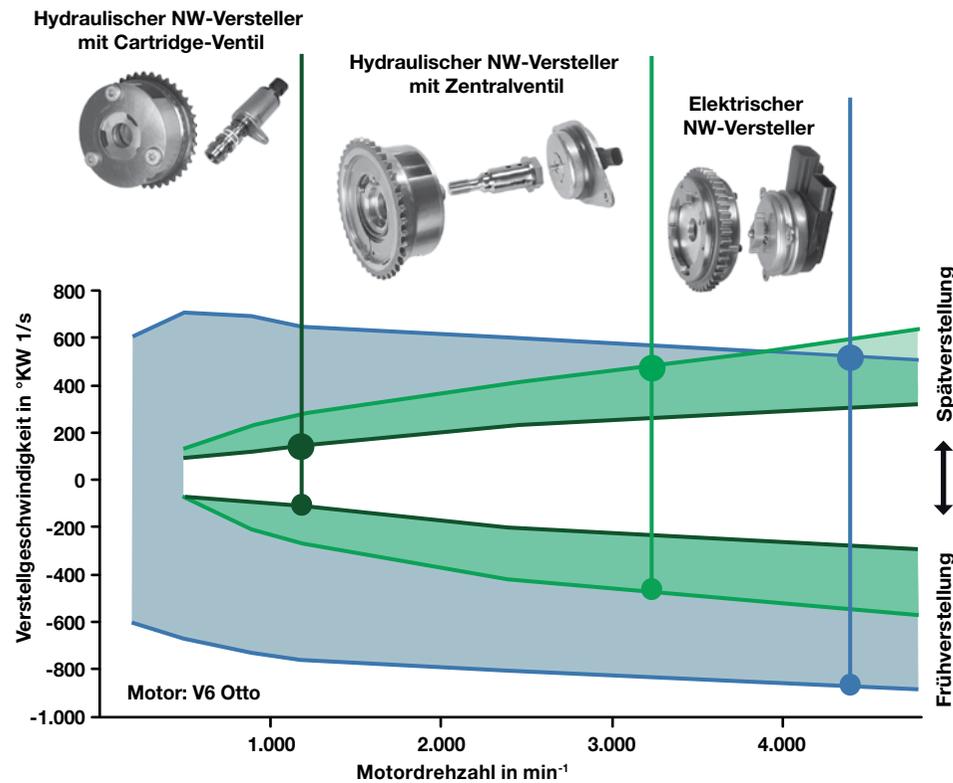


Bild 5 Verstellgeschwindigkeit hydraulischer und elektrischer Nockenwellen-Phasensteller

dernde Randbedingung. Denn je geringer der Öldruck ist, desto weniger Energie steht zur Verfügung, um die Nockenwelle zu verstellen.

Erstmals präsentiert Schaeffler daher einen Phasenversteller mit drucklosem Zusatz-Ölspeicher: Der zusätzliche Ölspeicher ist in Bohrungen im Rotor des Nockenwellenverstellers angeordnet – also direkt neben den Ölkammern, deren Befüllung die Verstellung auslöst. Dieses Ölreservoir ist nicht mit Druck beaufschlagt, sondern verbessert die Verstellgeschwindigkeit dadurch, dass es Volumen bereitstellt, das nicht von der Ölpumpe nachgeführt werden muss [3].

Schaltelemente

Eine weitere Möglichkeit, die Variabilität des Ventiltriebs zu erhöhen, stellen Schaltelemente zur Hubvariation einzelner Ventile dar. Solche Systeme zielen insbesondere auf die Zylinderabschaltung, eine stufenweise Entdrosselung sowie auf eine innere Abgasrückführung (AGR) ab und werden in verschiedenen Ausführungen angeboten (Bild 6):

- Im einfachsten Fall ist lediglich eine Stilllegung einzelner Ventile – und damit auch Zylinder – über ein schaltbares Abstützelement möglich. Solche Elemente werden seit mehreren Jahren am Markt erfolgreich eingesetzt.

- Schaltbare Schleppebel oder Tassenstößel werden auch für die zweistufige Hubumschaltung und damit zur Teil-Entdrosselung eingesetzt. Durch den Einsatz eines Schiebenockensystems ist sogar eine dreistufige Variation des Ventilhubes möglich. Damit kann wahlweise eine Zylinderabschaltung mit einer Umschaltung zwischen zwei diskreten Hüben oder eine Schaltung zwischen drei Hüben dargestellt werden. Schaeffler entwickelt dafür eine mechanische Lösung, die so robust ausgelegt ist, dass sie alle üblichen Anforderungen an die Lebensdauer eines Ventiltriebs erfüllt.
- Mit einem schaltbaren Schleppebel kann ein zweiter Ventilhub außerhalb der vorgegebenen Ersthubkontur vorgenommen werden. Damit ist eine innere Abgasrückführung entweder über das Rückschieben von Abgas in den Ansaugtrakt oder das Zumessen von Abgas durch ein zweites Öffnen des Auslassventils während der Ansaugphase möglich. Schaeffler hat ein solches System für einen japanischen Dieselmotor adaptiert.

Vollvariabler Ventiltrieb

Ein hohes Maß an Variabilität bieten elektromechanische oder elektrohydraulische vollvariable Ventiltriebssysteme, die heute bereits in Serie gefertigt werden. Der Antrieb erfolgt bei diesen Systemen weiterhin über die Nockenwelle. Elektromagnetische Verstellsysteme ohne Nockenwelle werden seit langem erforscht, sind jedoch nicht nur wegen des hohen elektrischen Leistungsbedarfs bislang nicht zum Einsatz gekommen. Die Nockenwelle stellt zusätzlich ein Sicherheitselement dar, das Fehlaktuatorien und damit Ventil-Kolben-Kontakt verhindert.

Schaeffler hat im Jahr 2009 das elektrohydraulische Ventiltriebssystem UniAir in Serie gebracht. 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.

	Schaltbares Abstützelement	Schaltbare Tasse	Schaltbarer Schleppebel	Schiebenockensystem
elektrohydraulisch betätigt				
elektromechanisch betätigt (größerer Temperaturbereich)				
Ventilabschaltung (1 Ventil pro Zylinder)	✓	✓	✓	✓
Zylinderabschaltung (Alle Ventile pro Zyl.)	✓	✓	✓	✓
Interne AGR (Zurückhalten)		✓	✓	✓
Interne AGR (Zurücksaugen)			✓	✓
Ventilüberschneidung				✓
zweistufig		✓	✓	✓
dreistufig				✓

Bild 6 Schaltsysteme zur Variation des Ventilhubes

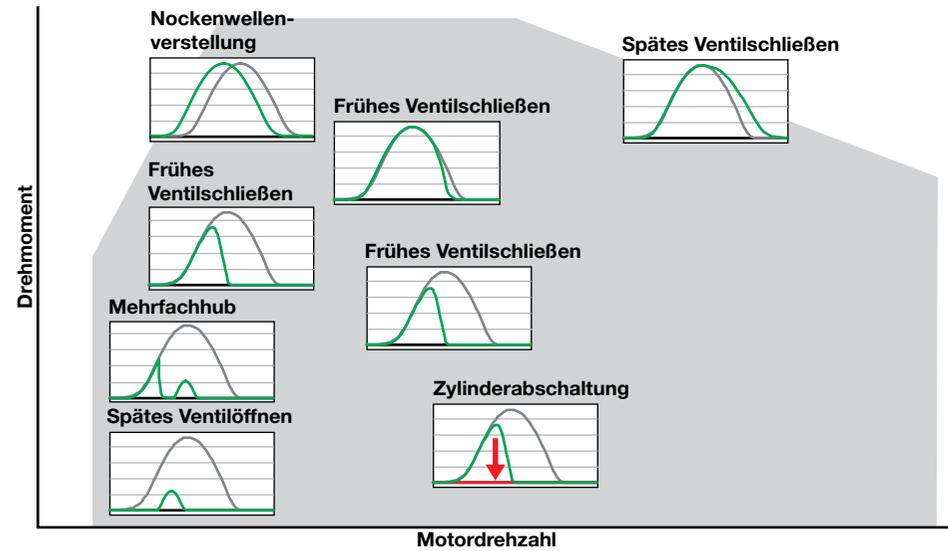


Bild 7 Ventilhubverläufe in verschiedenen Kennfeldbereichen

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

UniAir ermöglicht nicht nur eine stufenlose Variation des Ventilhubes, sondern auch – innerhalb der von der Hüllkurve der Nockenwelle vorgegebenen Maximalkontur – eine weitgehend freie Gestaltung des Ventilhubverlaufes. Dadurch ist eine Entdrosselung in weiten Kennfeldbereichen möglich (Bild 7).

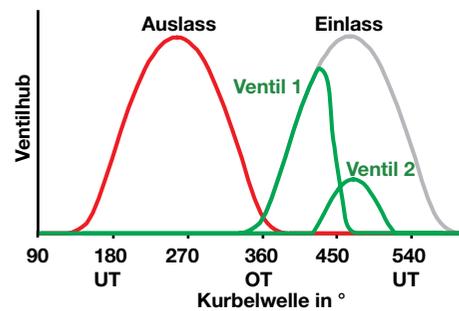


Bild 8 Möglicher Hubverlauf bei ventilindividueller Ansteuerung

Der hieraus resultierende Verbrauchsvorteil beträgt bis zu 15 % im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ).

Künftige UniAir-Generationen verfügen über neue Funktionen, die auf dem Schaeffler-Kolloquium 2014 noch detaillierter vorgestellt werden [4]. Zu nennen ist hier zum Beispiel die Einzelansteuerung zweier Einlassventile. Sie ermöglicht, vor allem bei niedrigen Lasten eine gezielte Ladungsbewegung zu erzeugen, die den Wirkungsgrad der Verbrennung deutlich erhöht. Bild 8 zeigt einen asymmetrischen Verlauf der Ventilerhebungen, wie ihn die Einzelansteuerung ermöglicht.

Aus Sicht von Schaeffler eignet sich die durch UniAir zu gewinnende Freiheit in der Ausgestaltung des Verbrennungsverfahrens für alle Fahrzeugsegmente. Low-cost-Motoren mit wenigen Zylindern können von dem Gewinn an Drehmoment bei gleichzeitig sinkendem spezifischem Verbrauch profitieren. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis ist anderen Maßnahmen wie der Kombination von Abgasturboaufladung und Direkteinspritzung deutlich überlegen. Große Motoren gewinnen insbesondere durch die Ent-

drosselung im Teillastbereich. Zudem können mit neuen Funktionen künftige Brennverfahren unterstützt werden, bei denen die sehr schnelle Aktorik des Systems ihren Vorteil ausspielt.

Verringerung der Reibleistung

Die Verringerung der Reibleistung ist seit jeher ein wesentliches Entwicklungsziel im Motorenbau. Dabei stand bisher im Wesentlichen die innere Reibung im Zylinder im Vordergrund, insbesondere die Reibung an der Paarung Kolben/Kolbenring-Zylinder. Durch die immer striktere CO₂-Gesetzgebung werden zunehmend alle anderen Verlustquellen ebenfalls betrachtet. Dies gilt insbesondere für

- den Kurbeltrieb
- den Ventiltrieb
- die Ausgleichswellen
- den Antrieb der Nockenwellen und der Nebenaggregate
- die Verluste durch den Betrieb der Kühlmittel- und der Ölpumpe.

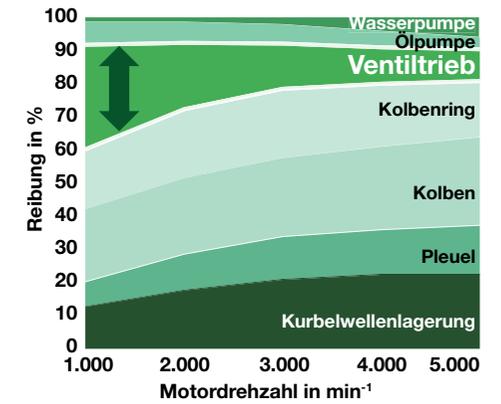


Bild 9 Typische Verlustleistungsanteile einzelner Reibungsursachen über der Motordrehzahl für einen Ottomotor

In Summe stehen diese Reibungsanteile für etwa 50 % der Reibleistung eines durchschnittlichen Verbrennungsmotors (Bild 9). Zudem gewinnt das Aufheizverhalten des Motors aufgrund des Zusammenhangs von Reibung und Öltemperatur an Bedeutung. Aufgrund des Kaltstarts im Testzyklus NEFZ

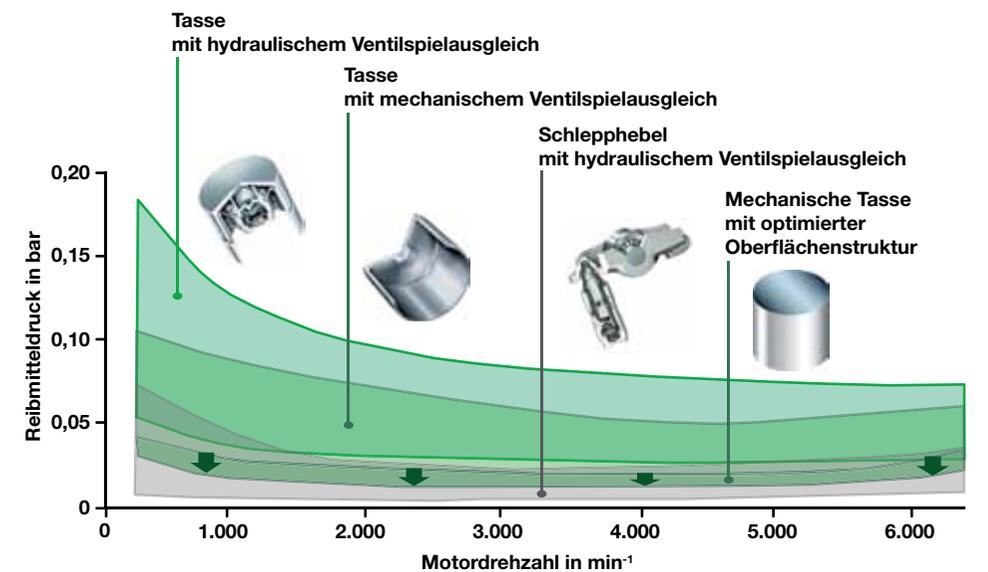


Bild 10 Reibleistungsvergleich für verschiedene Ventiltriebsarten

wirkt sich diese Verlustleistung direkt auf den Normverbrauch aus.

Besonders hohe Anteile an der bei niedrigen Drehzahlen auftretenden Reibleistung hat der Ventiltrieb. Durch die tribologische Optimierung von Tassenstößeln konnten in den vergangenen 20 Jahren große Fortschritte erzielt und der effektive Reibmitteldruck um rund 50 % reduziert werden (Bild 10). Parallel dazu haben sich Rollenschlepphebel zur Ventilbetätigung durchgesetzt – sie verbinden den hydraulischen Ventilspielausgleich mit prinzipbedingt geringer Reibung.

Moderne Motoren – Otto wie Diesel – mit hohen spezifischen Leistungen und geringen Zylinderzahlen werden immer häufiger mit Ausgleichswellen ausgestattet. Die Reibung an der Wellenlagerung ist aufgrund der hohen Drehzahl (doppelte Kurbelwellen-Drehzahl beim Vierzylinder) besonders relevant. Der Wechsel auf Wälzlagerung bei gleichzeitig gewichtsoptimierter Bauteilauslegung (siehe Bild 5 in [2]), kann die CO₂-Emission eines Fahrzeuges um bis zu 2 % verringern. Der Gewichtsvorteil einer solchen Lösung beträgt rund 0,5 kg je Welle also 1 kg pro System bei einem Vierzylindermotor.

Erheblich geringere Reibleistungen können auch durch eine Wälzlagerung der No-

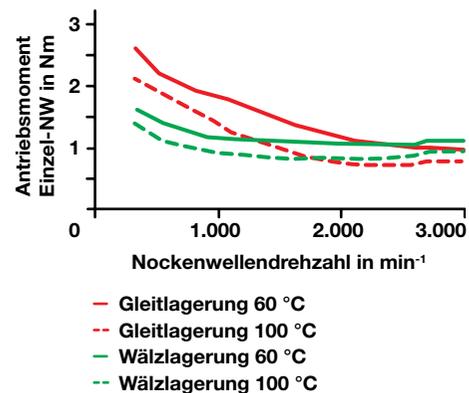


Bild 11 Antriebsmomente für eine Nockenwelle mit Gleit- und mit Wälzlagerung

ckenwellen erreicht werden (Bild 11). Dabei ist allerdings unbedingt das Montage-Konzept für den Zylinderkopf zu beachten.

Beim Antrieb der Nebenaggregate ist das wichtigste Ziel, eine einwandfreie Funktion über die Lebensdauer zu gewährleisten. Die Übertragung immer größerer Drehmomente und Leistungen führt im Riementrieb zu höheren Vorspannungen und damit höheren Verlustleistungen. Gleichzeitig nimmt der Eintrag von Schwingungen in den Riementrieb zu, da immer häufiger Motoren mit geringen Zylinderzahlen, aber hohen Mitteldrücken und damit hohen Drehungleichförmigkeiten zum Einsatz kommen. Innovative Riemenspanner und Kurbelwellenentkoppler von Schaeffler sind in der Lage, die höheren Momente sicher und schwingungsarm zu übertragen und gleichzeitig die auftretende Verlustleistung zu minimieren [5].

Mehr Dynamik, weniger Verluste – Besondere Betriebszustände

Die Optimierung statischer Kennfeldpunkte alleine ist für die Gesamtoptimierung des Verbrennungsmotors nicht zielführend. Denn zum einen werden künftige Verbrauchsmesszyklen höhere Dynamikanteile aufweisen, zum anderen kommen zunehmend Hybridkonzepte zum Einsatz, bei denen Fahrzustand und Motorbetriebspunkt nicht mehr eindeutig korrelieren.

Beschleunigen

Das dynamische Ansprechverhalten von Motoren mit hohem Aufladegrad kann durch die Einstellung eines positiven Spülgefälles gezielt verbessert werden. Um die

dafür notwendige Veränderung der Ventilöffnungszeiten rasch in Gang zu setzen, ist eine sehr schnelle Betätigung der Nockenwellen-Phasensteller wünschenswert.

Ein elektromechanischer Phasensteller erlaubt sehr hohe Verstellgeschwindigkeiten von mehr als 250 °KW/s [6]. Er bietet zudem eine höhere Steifigkeit bei Drehmomentbeaufschlagung zwischen Antriebsrad und Nockenwelle und erzielt daher die höchste Verstellgenauigkeit.

Außerdem bietet das elektrische System als einziges die Möglichkeit, die Steuerzeit beim Motorstart frei zu wählen. Dadurch kann ein Motorstart mit minimaler Verdichtung realisiert werden, was in einem vibrationsarmen Anspringen resultiert und zudem eine deutlich geringere Anlasserleistung benötigt. Ein elektromechanischer Phasensteller ist weitgehend temperaturunabhängig, während hydraulisch aktuierte Systeme je nach Auslegung erst bei Außentemperaturen von +7 °C bis +20 °C nutzbare Verstellgeschwindigkeiten bieten.

Der hohen Leistungsfähigkeit steht allerdings auch ein erhöhter Aufwand gegenüber. Bei Schaeffler geht ein solches System erstmals 2015 in Serie. Dabei wird der Verstellbereich des Kurbelwinkels bis zu 95° betragen. Die Konstruktion wird so ausgeführt, dass nur geringe Änderungen am Zylinderkopf des Serienmotors notwendig sind.

Darüber hinaus gilt es natürlich, den Abgasturbolader bei einer Vollastbeschleunigung möglichst rasch auf seine Maximaldrehzahl zu bringen. Dafür werden zunehmend zweistufige Abgasturboladersysteme eingesetzt, wobei der erste Lader relativ klein ausgeführt wird und mit entsprechend geringer Massenträgheit behaftet ist. Der Einsatz einer Wälzlagerung bei einem Turbolader führt zu deutlich geringeren Reibungsverlusten [7] und damit einer kürzeren Ansprechzeit. Die Einsparung ist so groß, dass potenziell der Lader bei gleichem Ansprechverhalten größer ausge-

führt werden kann und so in bestimmten Leistungsklassen der mit Kosten verbundene Einsatz eines zweiten Laders vermieden werden kann.

Motor-Warmlauf

Die hohe thermodynamische Effizienz moderner Motoren hat auch Nachteile: Es entsteht signifikant weniger Abwärme, die zum Aufheizen des Motors und des Getriebes und je nach Witterung auch für den Fahrzeug-Innenraum benötigt wird. Gleichzeitig verlangen die gesetzlichen Messzyklen zur Bestimmung der CO₂- und Abgasemissionen einen Kaltstart. Um die wenige Wärme optimal – im Sinne guten Insassenkomforts und niedriger Emissionen – verteilen zu können, hat Schaeffler ein Thermomanagementmodul vorgestellt (Bild 12).

In der Warmlaufphase des Motors ist das Modul dazu in der Lage, den Kühlmittelintritt in den Motor komplett abzusperren oder einen Minimalvolumenstrom einzustellen. Im betriebswarmen Zustand



Bild 12 Aufbau des Thermomanagementmoduls von Schaeffler mit integrierter Wasserpumpe

kann die Kühlmitteltemperatur je nach Lastanforderung und äußeren Randbedingungen schnell auf verschiedene Temperaturniveaus geregelt werden. Das Bauteil verfügt über zwei gekoppelte Drehschieber, die mit nur einem Antrieb auskommen. Der erste Serienmotor, der mit einem multifunktionalen Kühlwasserregler von Schaeffler ausgestattet wurde, ist der 1,8-l-TFSI-Motor von Audi (Vierzylinder-Reihenmotor, dritte Generation). Die Erwärmung des Kühlwassers wird durch das Modul – im Vergleich zum Vorgängermotor mit Wachsthermostat – um 30 % beschleunigt. Die Zeitspanne bis zum Erreichen der Özieltemperatur reduziert sich sogar um 50 % [8].

Für künftige Anwendungen stehen vor allem kompakte Ausführungen für kleinere Motoren und Fahrzeuge sowie die Weiterentwicklung der Funktionsintegration im Fokus [8]. Hierzu gehört ein Multifunktionsmodul mit separaten Kreisläufen für den Motorblock und den Zylinderkopf („Split cooling“). Bei geschickter Anwendung eines Thermomanagementmoduls sind nach Schätzung von Schaeffler CO₂-Einsparungen von bis zu 4 g/km möglich. Eine regelbare Wasserpumpe stellt eine gute Lösung vor allem für Nutzfahrzeuge dar, deren Kühlkreislauf stets auf Bergfahrten ausgelegt, bei Fahrt in der Ebene jedoch überdimensioniert ist.

Motor aus

Den geringsten Verbrauch erzielt ein Motor natürlich, wenn er nicht in Betrieb ist. Moderne Fahrzeuge stellen daher in den Verbrauchsmesszyklen, aber auch im realen Verkehr den Motor immer häufiger ab. Für 2016 wird erwartet, dass in Europa zwei Drittel aller Neuwagen über ein Start-Stopp-System verfügen und diese Systeme ab 2019 in den meisten Segmenten zur Grundausstattung konventionell angetriebener



Bild 13 Entkopplungsspanner von Schaeffler

Fahrzeuge gehören [9]. Der Verbrauchsvorteil im NEFZ beträgt bis zu 4,5 %. Im künftigen Zyklus „Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure“ (WLTP) sinkt der Anteil der Stillstandszeit von 23 auf ca. 13 %, so dass mittels Start-Stopp-Systemen ein geringerer Vorteil erzielt werden kann. Allerdings ist der WLTP in Summe dynamischer, so dass Fahrzeug-Segelfunktionen an Gewicht gewinnen werden. Realisiert werden kann das Segeln – genauer das Wiederanlassen des Verbrennungsmotors am Ende der Segelphase – im einfachsten Fall mit einem riemengetriebenen Starter-Generator. Entwicklungsziel ist dabei ein für den Fahrer nicht oder kaum wahrnehmbarer Übergang des Betriebszustandes. Allerdings treten – verglichen mit einem konventionellen Riementrieb – hohe Drehmomentspitzen auf, die neue Riementenner-Konzepte notwendig machen. Unter der Vielfalt möglicher Konzepte, die vom Einsatz zweier mechanischer Spanner bis zu einem hydraulisch aktuierten Spanner reichen, präsentiert Schaeffler einen am Generator verbauten Entkopplungsspanner (Bild 13).

Die Funktion dieses neuen Spanners ist in [5] detailliert erläutert.

Ausblick

Mit den in diesem Beitrag überblickartig dargestellten Technologien sind erhebliche Effizienzsteigerungen bei den ohnehin schon sparsamen Verbrennungsmotoren der Gegenwart zu erreichen. Das gesamte zum heutigen Stand der Serienmotoren verbleibende Effizienzsteigerungspotenzial schätzt Schaeffler auf 20 % für Ottomotoren und auf 10 % für Dieselmotoren. Bei aktuell neu erscheinenden Motoren sind jedoch schon Teile dieses Potenzials umgesetzt.

Darüber hinaus bestehen bei konsequenter Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors zusätzliche Potenziale, auch wenn die dazu bestehenden Ideen noch nicht durch serienreife Technik abzudecken sind:

- Völliger Verzicht auf die Vollastanfertigung auch bei Ottomotoren, deren Literleistungen 100 kW/l erreichen oder überschreiten. Dies würde neben dem Verbrauchsvorteil auch eine Verminderung der Partikel-Rohemissionen ermöglichen.
- Der Ersatz von Gleitlagern durch Wälzlager im Kurbeltrieb, dessen grundsätzliche technische Machbarkeit bereits erwiesen ist, auch wenn eine akustisch befriedigende Lösung bis heute nicht erreicht ist. Untersuchungen im Hause Schaeffler haben ein CO₂-Einsparpotenzial von rund 3 % identifiziert.
- Eine Zylinderabschaltung, die nicht stets dieselben Zylinder stilllegt, sondern rundum wechselt [10], was das Erkalten einzelner Zylinder verhindert.

Um solche Potenziale konsequent zu nutzen, ist künftig aus Sicht von Schaeffler eine noch engere Abstimmung der Motoren- und der Getriebeentwicklung notwendig. Denn nur wenn effiziente Antriebe hinsichtlich Akustik und Schwingungen die Erwartungen der Kunden erfüllen, werden sie am Markt erfolgreich sein. Wie stark die ge-

samte CO₂-Emission aus dem Straßenverkehr gesenkt werden kann, hängt wiederum wesentlich davon ab, wie schnell sich effiziente Antriebe durchsetzen. Hier liegt eine große Aufgabe, die die Entwickler von Verbrennungsmotoren und Getrieben gemeinsam bewältigen müssen.

Literatur

- [1] Gutzmer, P.; Hosenfeldt, T.: Marktgerechte Reibungsoptimierung. ATZ 115, 2013, Nr. 11, S. 876ff.
- [2] Gutzmer, P.: Individualität und Vielfalt: Paradigmen künftiger Mobilität. 10. Schaeffler Kolloquium, 2014
- [3] Dietz, J.; Busse, M.; Räcklebe, S.: Bedarfsgerechte Konzepte für Nockenwellenverstellungssysteme. 10. Schaeffler Kolloquium, 2014
- [4] Haas, M.; Piecyk, T.: Ventiltriebe zur Umsetzung innovativer Verbrennungsstrategien. 10. Schaeffler Kolloquium, 2014
- [5] Stuffer, A.; et al.: Aufbruch zu 48-V-Riementriebsystemen: Neue Spanner- und Entkopplerlösungen für riemengetriebene Mild-Hybrid-Systeme. 10. Schaeffler Kolloquium, 2014
- [6] Strauß, A.; et. al: Quo vadis, hydraulischer Nockenwellenversteller? 9. Schaeffler Kolloquium, 2010
- [7] Kropp, M.; et al.: Optimierung des transienten Verhaltens eines Abgasturboladers am Beispiel eines Pkw-Diesel-Motors. 13. Internationales Stuttgarter Symposium, 2013
- [8] Weiss, Michael: Heiß & kalt: Schaeffler Thermomanagement für bis zu 4 % CO₂-Reduktion. 10. Schaeffler Kolloquium, 2014
- [9] Kirchner, E.; Eckl, T.: Neue Märkte und Technologien für Start-Stopp-Systeme: Ansätze zur Verbesserung der Effizienz sowie des Komforts bei Motorstillstand und Wiederstart, 10. Schaeffler Kolloquium, 2014
- [10] Faust, H.: Antriebssysteme der Zukunft: Motor-, Getriebe- und Dämpfersysteme für Downsizing, Downsizing und Zylinderabschaltung. 10. Schaeffler Kolloquium, 2014