

Einleitung

Eine der Optionen zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs besteht im Downsizing. Der Reduktion des einzelnen Zylindervolumens sind jedoch enge Grenzen gesetzt, wenn der thermodynamisch ideale Zylinderinhalt von 400 bis 500 cm³ beibehalten werden soll. In der Praxis bedeutet daher Downsizing häufig, die Zahl der Zylinder zu reduzieren.

Einen attraktiven Kompromiss stellt das „temporäre Downsizing“ in Form der Zylinderabschaltung dar. Dadurch können gerade bei geringer Lastanforderung und Drehzahl die Bereiche des günstigsten spezifischen Verbrauchs genutzt werden. Gleichzeitig steht bei Bedarf ein leistungsstarker Motor zur Verfügung, der Fahrspaß und hohen Komfort hinsichtlich Akustik und Vibrationsverhalten gleichermaßen gewährleistet.

Erfolgskritisch für eine breitere Markteinführung dieser Technik ist neben ihrer technischen Effizienz, dass sie sich bei akzeptablen Kosten in bisherige Motorkonzepte integrieren lässt.

Ausführungsformen

Die konsequenteste Form der Zylinderabschaltung ist umgesetzt, wenn nicht nur Einspritzung und Zündung der betroffenen Zylinder stillgelegt werden, sondern auch alle beweglichen Teile – inklusive der Kolben. So wird das gesamte thermodynamische Potenzial erschlossen und die innere Reibung des Motors erheblich reduziert. Freilich sind Kompromisse bei der Zündfolge und Abstriche beim Massenausgleich

Hersteller	Motorbezeichnung	Ventiltriebkonzept	Status
GM	6,0-I-V8-6-4-Motor	Stoßstangentrieb, Schaltbarer Kipphebel drehpunkt	SOP/EOP 1980
	3,9-I-V6-Motor	Schaltbarer Rollenstößel	EOP 2008
	5,3-I-V8-Motor	Schaltbarer Rollenstößel	Serie
	4,3-I-V6-Motor	Schaltbarer Rollenstößel	Serie
	6,0-I-V8-Motor	Schaltbarer Rollenstößel	Serie
Daimler	5,0-I-V8-Motor	Schaltbarer Kipphebel; MB	EOP 2005
	5,8-I-V12-Motor	Schaltbarer Kipphebel; MB	EOP 2002
Chrysler	5,7-I-V8-Motor	Schaltbarer Rollenstößel	Serie
	6,4-I-V8-Motor	Schaltbarer Rollenstößel	Serie
Honda	3,5-I-V6-Motor	Schaltbarer Kipphebel	Serie
AMG	5,5-I-V8-Motor	Schaltbares Abstützelement	Serie
VW-Gruppe	1,4-I-R4-Motor	Schaltbares Abstützelement, VW/Audi	Serie
	4,0-I-V8-Motor	Schiebenockensystem, Audi	Serie
	6 ¾-I-V8-Motor	Schaltbarer Rollenstößel	Serie
	6 ¾-I-V8-Motor	Schaltbarer Rollenstößel	Serie
	6,5-I-V12-Motor	nur Aussetzen der Kraftstoffeinspritzung	Serie

Bild 1 Beispiele von Motorkonzepten mit Zylinderabschaltung

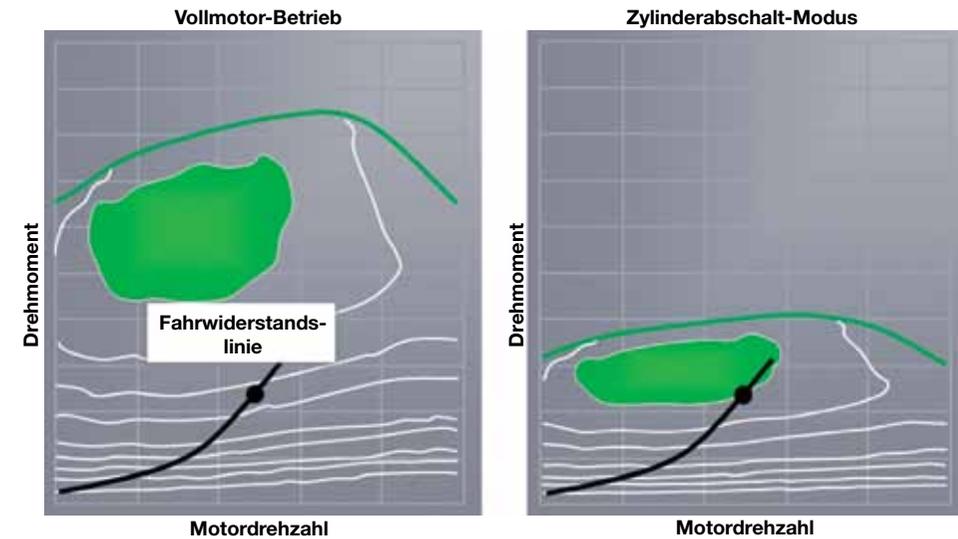


Bild 2 Betriebskennfeld und Fahrwiderstandslinie: Die Bereiche des günstigsten spezifischen Verbrauchs werden im Zylinderabschaltmodus angefahren (rechte Grafik), nicht aber im Vollmotor-Betrieb

in Kauf zu nehmen. Gravierender jedoch erscheint der Aufwand, der erforderlich ist, um den Motor in einen Teil aufzutrennen, der dauernd läuft, und einen, der ab- und zugeschaltet werden kann. Schon die dafür notwendigen Kupplungskonzepte an der Kurbel- wie an der Nockenwelle halten einer Kosten-Nutzen-Analyse nicht stand. Deshalb ist mit einer Realisierung vorläufig nicht zu rechnen.

Nahezu alle heute bekannten Systeme der Zylinderabschaltung unterbrechen die Einspritzung und Zündung sowie die Ventilbetätigung der abzuschaltenden Zylinder (Bild 1). Derzeit erstrecken sich die Applikationen auf Motoren mit 4 bis 12 Zylindern. Untersuchungen von Schaeffler zeigen jedoch, dass auch bei einem Dreizylindermotor das temporäre Abschalten eines Zylinders den Verbrauch noch weiter senken kann.

Um einen akzeptablen Motorlauf sicherzustellen, werden – entsprechend der Zündfolge – nur bestimmte Zylinder abgeschaltet.

Wirkung und Potenzial

Bei gegebener Leistungsanforderung müssen die nach der Zylinderabschaltung weiterhin betriebenen Zylinder einen höheren Mitteldruck erzeugen. Diese Lastpunktverschiebung führt zu einer Reduzierung der Drosselverluste des Motors und in der Folge zu Verbrauchseinsparungen (Bild 2). Außerdem sinkt durch die Deaktivierung der Ventile die Reibleistung im Zylinderkopf, was sich in einer zusätzlichen Verbrauchsverbesserung niederschlägt.

Das Potenzial zur Verbrauchsreduzierung beim Zwei- gegenüber dem Vierzylinder-Betrieb soll anhand einer Simulationsrechnung an einem 1,4-I-Vierzylindermotor aufgezeigt werden. Die Linie „a“ zeigt die Mitteldrücke, bei denen im Zweizylinder-Betrieb die optimale Verbrennungsschwerpunktlage (8° NW nach OT) gefahren werden kann (Bild 3).

Bei höheren Mitteldrücken im Zweizylinder-Betrieb muss die Zündung nach „spät“

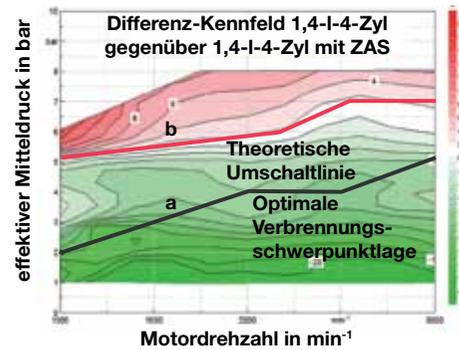


Bild 3 Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs durch Zylinderabschaltung (Simulationsergebnis)

verstellt werden, um das Klopfen zu vermeiden. Dadurch läuft die Verbrennung nicht mehr optimal ab, woraus ein Mehrverbrauch resultiert. Demgegenüber wirkt sich die bei höheren Mittelldrücken weiter geöffnete Drosselklappe positiv auf den Verbrauch aus. Die Linie „b“ stellt die theoretische Um-

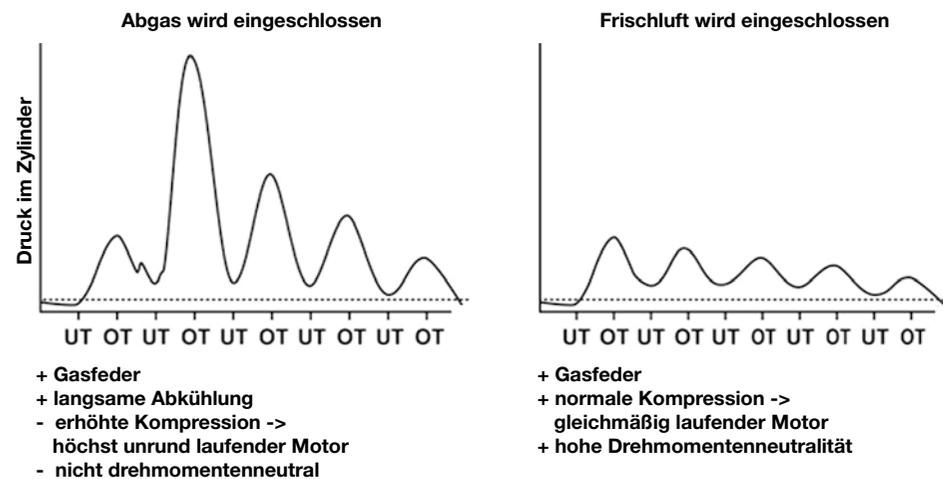
schaltlinie da, weil oberhalb dieser Linie mit einem Mehrverbrauch im Zweizylinder-Betrieb zu rechnen ist. Je nach Applikation und Kundenanforderung kann die Umschaltlinie auch deutlich unterhalb der Linie „b“ liegen.

Technische Umsetzung

Abschaltmodus

Bei der Zylinderabschaltung gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten, wie die Zylinder im Abschaltmodus befüllt werden (Bild 4):

- mit Abgas, das nach dem Verbrennungsprozess im Verbrennungsraum eingesperrt wird, oder
 - mit Frischgas.
- Beide Varianten lassen das eingesperrte Gas als Druckfeder arbeiten.



Quelle: MTZ „Der neue AMG 5,5-l-V8-Saugmotor mit Zylinderabschaltung“

Direkte Einspritzung erlaubt die Umsetzung von „Frischlufft wird eingeschlossen“

Bild 4 Mögliche Optionen der Zylinderbefüllung und ihre Auswirkungen im Abschaltmodus

Rollierende Zylinderabschaltung

Dem heutigen Stand der Technik entsprechend werden immer dieselben Zylinder abgeschaltet. Schaeffler untersucht derzeit ein Konzept für Viertaktmotoren, bei dem jeder Zylinder nach jedem Zündtakt abgeschaltet und zum nächsten Zündtakt wieder befeuert wird. Die Zylinderabschaltung rolliert also innerhalb einer Abschaltphase und nicht, wenn jeweils ein neuer Abschaltmodus eingeleitet wird (Bild 5). Dadurch erreicht man ein ausgeglicheneres Temperaturniveau der Brennräume untereinander und beim Dreizylinder gleichmäßige Zündabstände im abgeschalteten Betriebsmodus.

Gerade bei einer solchen Auslegung müssen die Verluste beim Übergang vom Betriebs- in den Abschaltmodus klein gehalten werden. Deshalb verbietet sich das Einschließen von Restgas, wie oben dargestellt. Auch die Zylinderfüllung mit Frischluft birgt wegen der nachlassenden Ladungsbewegung Nachteile.

Als besonders günstig erscheint die Variante, bei der ein kleiner, exakt zugemessener Teil an Restgas im Verbrennungsraum eingeschlossen wird. Die durch die Expansion entstehende Saugwirkung dauert zu kurz, um einen nennenswerten Verlust an Motoröl zu erzeugen. Der Vorteil ist, dass beim Wiederbeginn des Arbeitsspiels die notwendige Menge Frischluft ungehindert einströmen kann. So läuft schon der erste Verbrennungstakt ohne effizienzmindernde Effekte ab. Damit

Die Wärme des eingeschlossenen Abgases führt zu einer langsameren Abkühlung des Zylinders, zu anderen resultieren aus der größeren Gasmenge sehr unterschiedliche Drücke im Zylinder und damit höhere Ungleichförmigkeiten an der Kurbelwelle. Die Gasdrücke, die beim ersten Verdichten bei geschlossenen Auslassventilen entstehen, können sogar noch höher sein als bei der Verbrennung. Die Abstützkräfte belasten Kolben und Zylinder nicht nur erheblich, sondern verursachen auch entsprechend hohe Reibungsverluste – entsprechend länger muss die Abschaltphase anhalten, damit ein positiver Gesamteffekt entsteht.

Wie im Bild 4 gezeigt, bauen sich die Druckspitzen dadurch ab, dass sich das Restgas abkühlt, aber auch durch Gasdiffusion vom Brennraum in den Kurbeltrieb (Blow-by). Simulationsrechnungen zeigen, dass sich nach etwa zehn Motorumdrehungen der Druck im Zylinder dem Niveau angeglichen hat, das beim Einsperren von Frischluft vorherrscht.

Letzteres ist nur bei einem Direkteinspritzer möglich. Die Kompressionsunterschiede zwischen den Zylindern sind hier kleiner, der Umschaltvorgang ist so besser abstimmbare. Dennoch fordert auch diese Variante Kompromisse: Die Luft im Brennraum verliert nach einigen Zyklen jegliche Tumble- oder Drallbewegung, die beim Ansaugen entstanden ist. Abhängig von der Brennraumgeometrie ist es unter Umständen dennoch möglich, den Motor aus diesem Zustand heraus wieder zu feuern. Allerdings ist dabei der Zündzeitpunkt anzupassen, so dass bei der Effizienz der Verbrennung erhebliche Zugeständnisse zu machen sind. Außerdem muss dafür Sorge getragen werden, dass im Verbrennungsraum kein Unterdruck wirksam wird, weil dieser sonst Motoröl ansaugen würde.

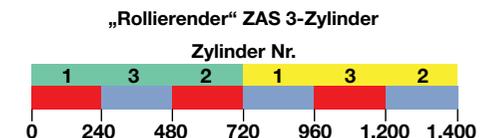


Bild 5 Systematik einer rollierenden Zylinderabschaltung: Die rot gekennzeichnete Phase steht für den Betriebsmodus.

die Menge des Restgases sowie der Unterdruck den optimalen Wert annehmen, bedarf es einer außerordentlich präzisen Steuerung der Auslassventile, wie sie zum Beispiel mit dem vollvariablen UniAir von Schaeffler möglich ist. Dieses System erzeugt zyklustreu jeden gewünschten Hub und hält bei Bedarf die Ventile auch ganz geschlossen. Zur Deaktivierung der Ventile auf der Einlassseite ist mindestens ein Zwei-Stufen-Schalter notwendig. Simulationen am Dreizylindermotor lassen vermuten, dass mit einer derart ausgelegten rollierenden Zylinderabschaltung der Verbrauch gegenüber einer konventionellen weiter zu senken ist (Bild 6).

Interessant könnte eine rollierende Zylinderabschaltung gerade bei Dreizylindermotoren im Hinblick auf die Schwingungsanregung sein.

Grundsätzlich kommen alle der im übernächsten Abschnitt vorgestellten Abschalt-systeme für eine einfache Zylinderabschaltung in Betracht.

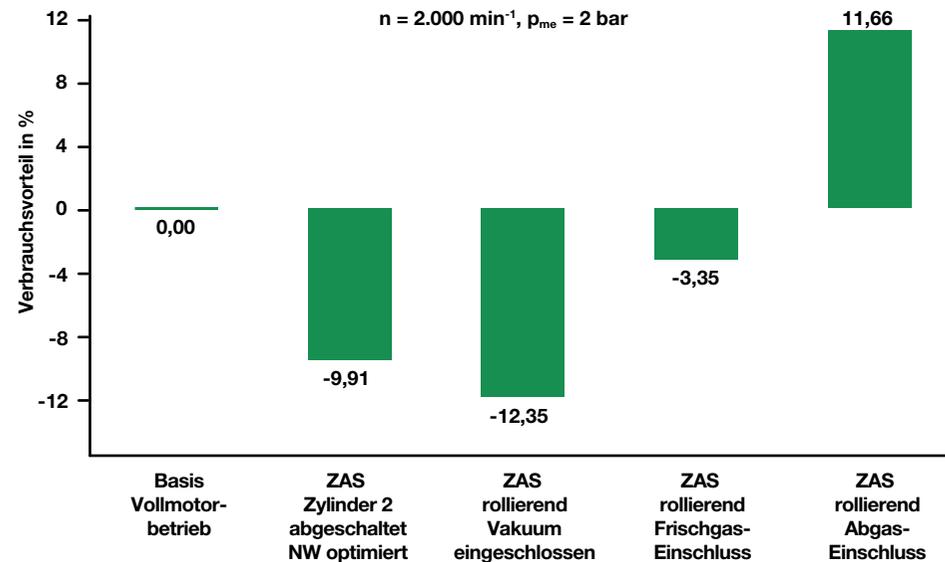
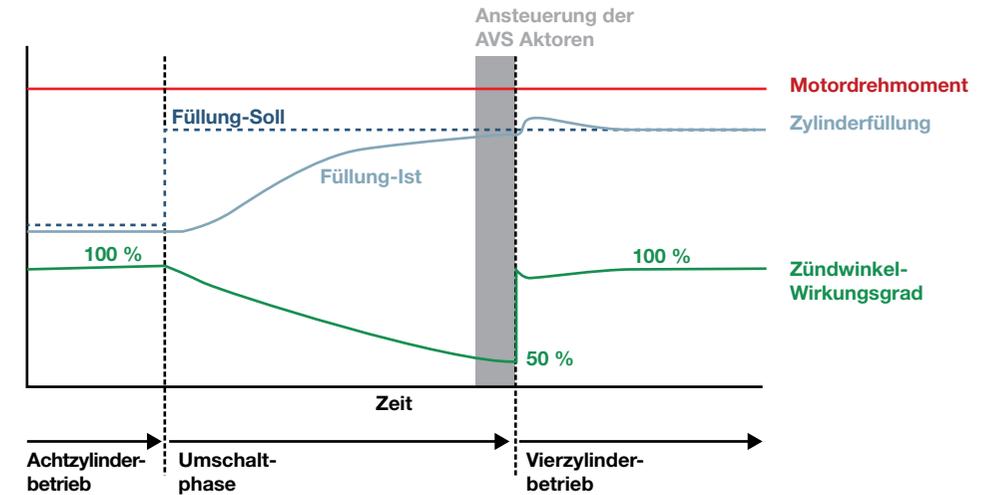


Bild 6 Unterschiedliche Auslegungen der rollierenden Zylinderabschaltung im Verbrauchsvergleich

Umschaltmodus

Eine logische Forderung besteht darin, dass der Umschaltvorgang für den Fahrer nicht spürbar sein soll. Dies bedeutet, dass das Umschalten drehmomentneutral erfolgen muss. Der Übergang zwischen den beiden Modi muss außerdem sehr rasch erfolgen, damit der Motor jederzeit auch spontane Gasbefehle umsetzen kann.

Beim Umschalten vom Vollzylinder- in den Halbzyylindermodus werden Drosselklappenposition (Zylinderfüllung), Zündzeitpunkt und Kraftstoffzufuhr so nachgeregelt, dass ein Drehmomentabfall verhindert wird (Bild 7). Dazu wird zuerst die Füllung erhöht und der Zündzeitpunkt in Richtung „spät“ verstellt. Ist die Sollfüllung erreicht, wird der Ventiltrieb umgeschaltet und gleichzeitig der Zündzeitpunkt auf den befeuerten Zylindern wieder auf den optimalen Wert eingestellt. Mit der Deaktivierung von Einspritzung und Zündung der abzuschaltenden Zylinder ist die Umschaltung abgeschlossen.



Quelle: MTZ - Der neue AUDI V8-TFSI Motor Teil 2

Bild 7 Regelung im Umschaltmodus

Da die Spätverstellung der Zündung einen momentanen Mehrverbrauch bewirkt, muss der Abschaltmodus mindestens so lange aktiviert bleiben, dass summarisch ein Verbrauchsvorteil entsteht. Der größte Gewinn ergibt sich, wenn der Motor über längere Zeit hinweg im Halbzyylindermodus gefahren wird, wie dies zum Beispiel bei Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit auf Autobahnen möglich ist.

An die Umschaltmechanismen werden folgende Anforderungen gestellt:

- Der Umschaltvorgang aller Zylinder muss genau in dem Zyklus erfolgen, der im Steuergerät vorgesehen wird.
- Die oben beschriebenen Maßnahmen zur Kompensation des Drehmoments müssen optimal aufeinander abgestimmt werden.
- Die Umschaltung muss entlang der Zündfolge geschehen.
- Beide Zustände müssen stabil laufen, es darf keine unbeabsichtigten Schaltungen geben.
- Da Fehl- und Nicht-Schaltungen abgasrelevant sind, ist eine Überwachungsfunktion zu implementieren.

Voraussetzungen im Systemumfeld

Auch wenn der Übergang von einem Zustand zum anderen in Bezug auf das Antriebsmoment neutral vonstattengeht, ändern sich das Schwingungsverhalten des Motors und die Akustik. Das erfordert möglicherweise Anpassungen an folgenden Bauteilen (Bild 8):

- Phasensteller
- Steuertrieb
- Nebenaggregate-Trieb
- Kupplung und Zweimassenschwungrad
- Auspuffanlage (Sound Engineering)
- Motorlager

Je nach Anwendungsfall und den damit verbundenen Erfordernissen ist es empfehlenswert, für den Fahrgastraum eine aktive Geräuschkompensation vorzusehen. Nichtsdestotrotz macht es der Komfortanspruch in der Regel notwendig, im

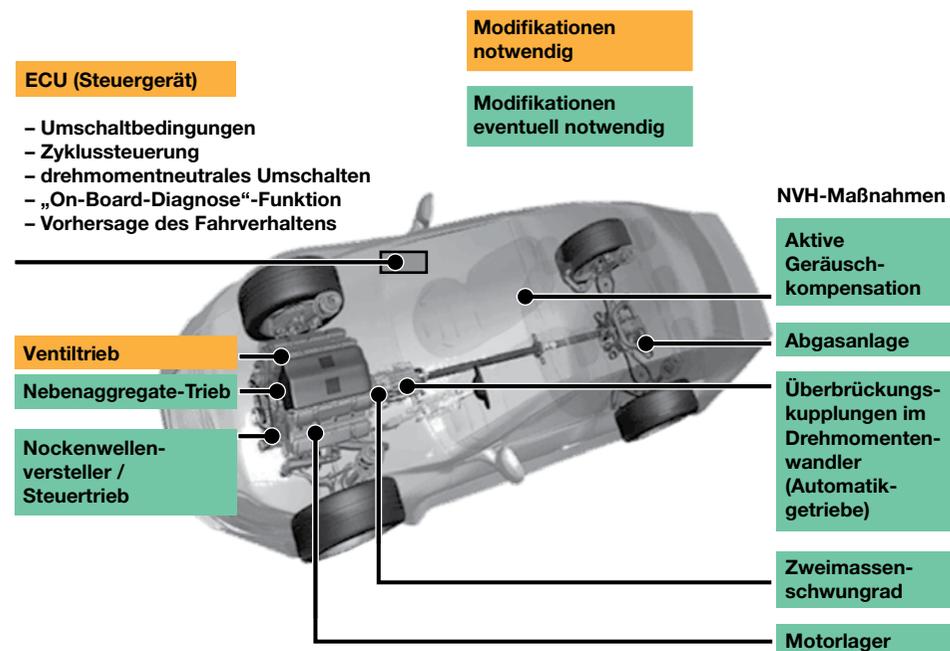


Bild 8 Übersicht über die begleitenden Maßnahmen zur Umsetzung der Zylinderabschaltung

Drehzahlbereich bis zu etwa 1.500 min⁻¹ – abhängig vom Motorconcept – immer alle Zylinder zu betreiben. Zudem kann die Zylinderabschaltung so lange nicht aktiviert werden, wie das Motoröl noch nicht Betriebstemperatur erreicht hat oder der Katalysator durch das Abschalten unter seine Light-off-Temperatur sinken würde.

sätzlich bieten sich dafür folgende Möglichkeiten an:

- schaltbare Tassenstößel
- schaltbare Schlepphebel
- schaltbare Abstützelemente
- Schiebenockensysteme
- mechanische vollvariable Ventiltriebssysteme auf der Basis von Rastkurvengetriebe
- elektro-hydraulische vollvariable Ventiltriebssysteme (zum Beispiel das UniAir-System von Schaeffler)

Hubabschaltung der Ventile

Wie bereits dargelegt, ist es nicht sinnvoll, bei der Zylinderabschaltung auch die beweglichen Teile des Kurbeltriebs stillzulegen. Die Hubabschaltung der Ventile dagegen ist auch schon mit vergleichsweise moderatem Aufwand darzustellen. Grund-

Die überwiegende Zahl der schaltbaren Elemente wird mittels Öldruck betätigt, der über ein vorgelagertes Schaltventil gesteuert wird. Das Konzept bedingt die Implementierung eines zusätzlichen Schaltölkreislafs. Bei dessen Gestaltung ist besondere Sorgfalt auf die Lage und Geometrie der Ölgalerien zu legen, um ein

möglichst hydraulisch steifes System zu erhalten und Luftansammlungen und Drosselstellen zu vermeiden. Bild 9 zeigt in einer prinzipiellen Darstellung ein System mit einem Schaltventil pro Zylinder.

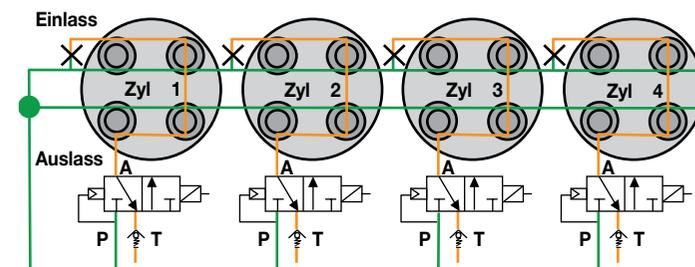


Bild 9 Prinzipielle Darstellung eines Ventilhub-Abschaltsystems mit 1 Schaltventil pro Zylinder

Auslegung Schaltölkreislauf

Für die Ansteuerung von hydraulisch betätigten zweistufigen Ventiltriebkomponenten und die Anordnung der Schaltventile im Zylinderkopf sind mehrere Lösungen denkbar. Entsprechend der Positionierung der Schaltventile und der Ausführung der Ölgalerien ergeben sich unterschiedliche Schaltzeitenfenster sowie systembedingte Restriktionen. Im Folgenden werden für einen Vierzylindermotor mit der Zündfolge 1-3-4-2 zwei unterschiedliche Möglichkeiten für eine Abschaltung der Zylinder 2 und 3 aufgezeigt und ihre Vor- und Nachteile näher erörtert.

In Bild 10 dargestellt ist die Variante mit einem Schaltventil pro Zylinder; das heißt: Ein Schaltventil steuert an jedem Zylinder die Einlass- und Auslassventile.

Der Vorteil dieser Auslegung besteht in kurzen Ölgalerien und kleinem Ölvolumen.

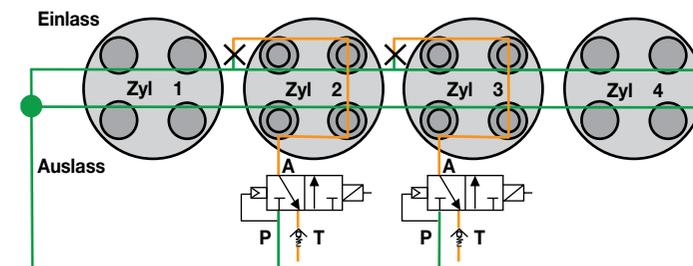


Bild 10 Ölkreislauf mit 1 Schaltventil pro Zylinder

Mit einer nennenswerten Ölverschäumung ist nicht zu rechnen, daher ist das System gegenüber Schaltzeitschwankungen kaum anfällig. Dieses Konzept ermöglicht ein Schaltfenster von etwa 250 °NW, was bei 3.000 min⁻¹ einem theoretischen Schaltzeitfenster von 28 ms entspricht. Für Motoren mit Nockenwellenverstellern gilt, dass der Einfluss des Verstellbereichs mit in die Bestimmung des Schaltzeitfensters einbezogen werden muss. Diese Variante lässt sich so ausbauen, dass auch alle Zylinder schaltbar sind. Dann sind beim Vierzylindermotor auch Schaltungen von vier auf drei, auf zwei oder sogar einen Zylinder möglich. Nachteilig ist die vergleichsweise aufwendigere Ausführung der Ölgalerie zwischen Einlass- und Auslassseite.

Alternativ kann der Ölkreislauf mit je einem Schaltventil für die komplette Einlass- und die komplette Auslassseite gesteuert werden (Bild 11). Das bedeutet: Die Einlass- und Auslassventile werden durch zwei unterschiedliche Schaltventile angesteuert. Der Vorteil dieser Anordnung ist darin zu sehen, dass das Schaltfenster unabhängig vom Verstellbereich des

Nockenwellenverstellers bestimmt werden kann. Außerdem sind die Ölgalerien einfacher zu gestalten, und die Schaltventile können leichter integriert werden. Dieses Design ermöglicht ein Schaltfenster von etwa 180 °NW, entsprechend einem theoretischen Schaltzeitfenster von 20 ms

bei 3.000 min⁻¹. Nachteilig hierbei sind die längeren Ölgalerien. Sie bedingen ein höheres Ölvolument, wodurch das System gegenüber Schaltzeitschwankungen durch Ölverschäumung anfälliger wird.

Außer den hier gezeigten Möglichkeiten zur Gestaltung des Schaltölkreislaufes und Anbindung der Schaltventile sind weitere denkbar. Entscheidend für die jeweilige Ausführung sind die Zündreihenfolge sowie das Zylinderkopf- und Ölgaleriedesign des Zielmotors. Das Hauptaugenmerk sollte darauf liegen, bei gegebenem Aufwand das größtmögliche Schaltzeitfenster zu erreichen.



Bild 12 Schaltbarer Schleppehebel

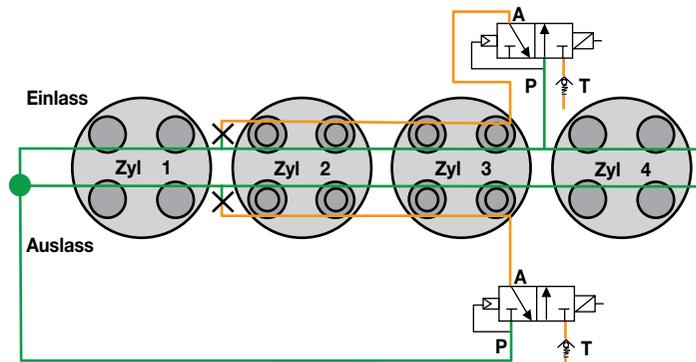


Bild 11 Ölkreislauf mit 1 Schaltventil pro Seite

Abschaltung durch schaltbare Elemente

Schleppehebel

Da die Ausführungen zum schaltbaren Schleppehebel auf den schaltbaren Tassenstößel übertragen werden können, soll auf diesen hier nicht weiter eingegangen werden.

Die Lösungsansätze, die auf miteinander koppelbaren Schleppehebeln oder Knickhebeln beruhen, die im Gelenkpunkt eine Arretiervorrichtung aufweisen, sind zahlreich. Alle auf Öldruck basierenden Systeme benötigen Federelemente, die die abgeschalteten Komponenten nach der Nockenerhebung in die Ausgangslage zurückbringen (Bild 12). Der Schaltmechanismus muss so ausgebildet sein, dass der volle Ventilhub erzeugt wird, wenn kein Öl-Druck vorliegt (drucklos verriegelt). Dies erfüllt die Notlaufbedingung und ist für den Kaltstart des Motors notwendig.

Neben den Vorteilen, die sich durch die Zylinderabschaltung ergeben, haften diesem Konzept einige Nachteile an: Die zusätzlichen Kontaktstellen und die zusätzlichen Bauteile führen zu einer Reduzierung der Steifigkeit gegenüber einem Standardhebel mit Auswirkungen auf das Schwingungsverhalten des Ventiltriebs. Die zu-

sätzlichen Bauteile führen zu einem höheren Massenträgheitsmoment des Hebels, was die Verwendung von stärkeren Ventildedern notwendig macht – mit Nachteilen für die Ventiltriebreibung. Mögliche Bauraumrestriktionen erzwingen schmalere Rollen mit der Folge von erhöhten Flächenpressungen zwischen Rolle und Nockenwelle.

Schaltshleppehebel, die sich im Abschaltmodus an einem Nullhubnocken abstützen, bilden ein stabileres System als die Variante ohne eine solche Abstützung. Nachteilig ist lediglich, dass die Nockenwelle pro Ventil zwei unterschiedliche Profile benötigt. Fehlt ein solcher Nullhubnocken, müssen die wirkenden Kräfte präzise aufeinander abgestimmt werden: Im entkoppelten Zustand muss die Lost-Motion-Feder einerseits stark genug sein, um ein „Aufpumpen“ – eine ungewollte Verlängerung – des Abstützelements zu verhindern. Andererseits darf sie nicht so stark sein, dass das Motorventil gegen die Ventildederkraft ungewollt geöffnet wird.

Abstützelement

Auch das schaltbare Abstützelement bietet sich für eine Abschaltfunktion an. Ähnlich wie beim schaltbaren Rollenstößel kann der innere Teil des Abstützelements teleskopisch in den äußeren Teil einfahren (Bild 13). Auch hier wird eine Feder oder ein Federpaket benötigt, um den beweglichen Teil wieder in seine Ausgangslage zurückzubringen. Auch hier betätigt Öl-Druck, der über ein vorgelagertes Schaltventil gesteuert wird, den Koppelmechanismus. Allerdings gelangt das Öl auf kürzerem Weg zum Koppelmechanismus. Bezüglich des Öl-Drucks bestehen die gleichen Restriktionen wie beim schaltbaren Schleppehebel.

Die Steifigkeit des Ventiltriebs reduziert sich nur durch die Koppelstelle im schaltbaren Abstützelement. Die Geometrie (mit Ausnahme der Ventilauf-Fläche) und das Massenträgheitsmoment des Schleppehebels bleiben unberührt. Damit muss die Ventildedervorspannkraft gegenüber dem konventionellen Ventiltrieb nicht verändert werden; das bedeutet, die Flächenpressungen zwischen Rolle und Nockenwelle bleiben niedrig.

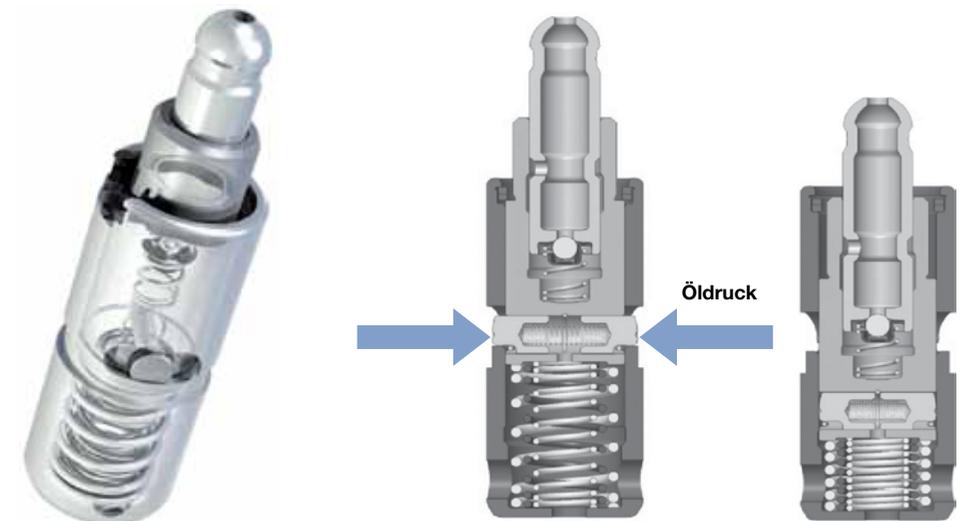


Bild 13 Schaltbares Abstützelement

Abschaltung mit Schiebenockensystem

Das Schiebenockensystem ermöglicht das Umschalten des Ventilhubes in bis zu drei Stufen. Das Umschalten erfolgt durch Verschieben eines Nockenstücks, das auf einer Zahnwelle axial beweglich angeordnet ist. Das Schiebenockenstück umfasst mehrere Nocken in zwei Gruppen, die den zwei Ventilen auf jeder Seite eines Zylinders zugeordnet sind (Bild 14).

In dem Schiebenockenstück ist eine Steuernut integriert. Wenn der Nockenhub verstellt werden soll, fährt in diese ein elektromagnetisch betätigter Stift ein. Er zwingt dadurch die ganze Einheit, ihre Position der Nutkontur folgend zu verändern. Somit wirkt ein zweites – bei dreistufigen Systemen auch ein drittes – Nockenprofil auf den Schlepphebel, der den neuen Nockenhub – gegebenenfalls auch als Null-Hub – auf das Ventil überträgt. Jedes Ventilpaar kann somit ein-



Bild 14 Zweistufiges Schiebenockensystem



Bild 15 Dreistufiges Schiebenockensystem

zeln aktuiert werden. Der Vorteil dieses Systems: Es kann zylinder- und nockenwellenselektiv geschaltet werden, und die Reihenfolge der zu schaltenden Elemente ist beliebig.

Nach erfolgter Aktuierung wird am Aktor ein Rückwurfsignal erfasst, das der zurückkommende Aktorstift durch Spannungsänderung in der elektrischen Spule erzeugt. Dieses Rückwurfsignal gibt zwar eindeutige Auskunft darüber, dass geschaltet wurde und in welche Richtung. Das genügt aber noch nicht dem Anspruch, die Stellung auch im weiteren Verlauf zu erkennen (Forderung der On-Board-Diagnose). Hier wird eine Eigenschaft des Schiebenockensystems zum Vorteil, die zunächst als Nachteil eingeschätzt wird: Beide Ventile werden zwangsweise gleichzeitig geschaltet. Das macht die Detektierung im laufenden Betrieb durch Sensoren (Druck- oder Lambdasonden) auf der Ansaug- wie auf der Abgasseite oder durch Auswertung der Drehmomentungleichförmigkeiten deutlich einfacher als bei Systemen mit Einzelschaltung.

Bei der Kosten-Nutzen-Bewertung ist festzuhalten, dass das Schiebenockensystem gegenüber den schaltbaren Elementen aufwendiger ausfällt, da bei einem Vierzylindermotor beide Nockenwellen mit einer Ab-

schaltfunktion ausgerüstet sein müssen – mit Auswirkungen auch auf die nicht schaltbaren Positionen. Das Schiebenockensystem wird kommerziell dann für die Zylinderabschaltung interessant, wenn ein schon bestehendes zweistufiges System zur Ventilhubvariation um eine dritte Stufe ergänzt wird, die der Zylinderabschaltung dient (Bild 15).

Theoretische Untersuchungen von Schaeffler zeigen, dass ein dreistufiges System in Verbrauchszyklen mit höheren Lastanteilen gegenüber einer zweistufigen Lösung weitere nennenswerte Potenziale erschließen kann. Wenn das Schiebenockensystem so ausgeführt wird, dass alle Einlass- und Auslassventile abschaltbar sind, können beliebig viele Zylinder abgeschaltet werden. Darüber hinaus eröffnet dies die Option, eine rollierende Zylinderabschaltung zu realisieren [3].

Zylinderabschaltung mit UniAir

UniAir steuert den Ventilhub nicht nur vollvariabel, sondern kann jeden beliebigen Zylinder auch komplett deaktivieren (Bild 16). Erreicht wird das Stilllegen durch die entsprechende Ansteuerung der systemimmanenten Schaltventile. In seiner heutigen Ausprägung werden beide Ventile gleichzeitig betätigt. Das bedeutet: Im Abschaltmodus sind immer beide Einlassventile geschlossen. Deshalb trifft auch bei UniAir zu, dass der Betriebszustand des Ventiltriebs leicht zu erkennen ist. Wenn UniAir nur auf der Einlassseite eingesetzt wird, besteht wie beim vollvariablen mechanischen System die Möglichkeit, schaltbare Abstützelemente auf den relevanten Positionen der Auslassseite einzusetzen.

Derzeit arbeitet Schaeffler an zusätzlichen Ventilhubkonfigurationen. Sie erreichen annähernd

das Potenzial der Zylinderabschaltung und können dennoch auf eine Ventilabschaltung auf der Auslassseite verzichten. Besonders reizvoll an einer solchen Konfiguration ist, dass sie ohne weitere Maßnahmen das Abschalten einer beliebigen Anzahl von Zylindern erlaubt. Detaillierte Ausführungen dazu sind dem Kapitel 12 [4] in diesem Buch zu entnehmen.



Bild 16 Elektro-hydraulisches vollvariables Ventiltriebssystem UniAir

Zusammenfassung und Ausblick

Das temporäre Stilllegen von Zylinder bildet einen attraktiven Kompromiss zwischen ökonomischem Betrieb durch Downsizing und Beibehalten von Komfort und Fahrspaß. Selbst bei Dreizylindermotoren lassen sich dadurch zusätzliche Einsparpotenziale erschließen, insbesondere wenn die Zylinder rollierend abgeschaltet werden.

Um Ventile zeitweise zu deaktivieren, stehen insbesondere für Schlepphebel-Steuerungen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Wenn die Zylinderabschaltung als einzige Variabilität verlangt wird, stellen schaltbare Abstützelemente eine besonders kostengünstige Lösung dar, ohne dass sie dabei die Grundfunktion des Ventiltriebs nennenswert einschränken. Für mehrstufige Systeme oder ganze Motorfamilien bieten sich Schiebennockensysteme an, weil sie gut adaptierbar sind. Den vollvariablen Ventiltriebssystemen ist die Zylinderabschaltung inhärent – mindestens unter Zuhilfenahme von diskret schaltbaren Elementen.

Je nach der Motorengröße und den damit verbundenen Komfortexpectationen der Kunden sind weitere Maßnahmen am Motor und am Fahrzeug notwendig. Sie stehen Verbrauchseinsparungen gegenüber, die gerade bei leichten Fahrzeugen mit leistungsfähigen Motoren hoch ausfallen können.

Es ist zu erwarten, dass die Zylinderabschaltung künftig ab dem Dreizylindermotor eine bedeutendere Rolle spielen wird als gegenwärtig.

Literatur

- [1] Middendorf, H.; Theobald, J.; Lang, L.; Hartel, K.: Der 1,4-l-TSI-Ottomotor mit Zylinderabschaltung. MTZ, 2012-03, S. 186-193
- [2] Kirsten, K.; Brands, C.; Kratzsch, M.; Günther, M.: Selektive Umschaltung des Ventilhubes beim Ottomotor. MTZ, 2012-11, S. 834-839
- [3] Faust, H.: Antriebssysteme der Zukunft: Motor-, Getriebe- und Dämpfersysteme für Downsizing, Downsizing und Zylinderabschaltung. 10. Schaeffler Kolloquium, 2014
- [4] Haas, M.; Piecyk, T.: Ventiltriebe zur Umsetzung innovativer Verbrennungsstrategien. 10. Kolloquium, 2014