

17

Das Beste aus zwei Welten Der stufenlose Schiebenockenventiltrieb

Jens Schäfer
Sebastian Zwahr
Prof. Dr. Michael Wensing,
Universität Erlangen-Nürnberg



Ausgangssituation

Aus technischer Sicht erfordert der Übergang vom Verbrennungsmotor über den Hybrid zum Elektroantrieb Änderungen am Fahrzeug aufgrund künftig geringerer Energieinhalte des Energiespeichers (konventionell Tank). Der Antrieb der Zukunft wird einhergehen mit einer Gewichtsreduzierung des Gesamtfahrzeugs, sei es durch weitere Fortschritte im Leichtbau oder durch vermehrten Einsatz kleinerer „Stadtfahrzeuge“. Downsizing wird die wichtigste Verbrauchsmaßnahme der nahen Zukunft und sehr kleine Motoren werden die Konsequenz sein.

Weltweit gesehen stellen Ottomotoren den heute dominierenden PKW-Antrieb dar. Für diese Motoren werden vollvariable Ventiltriebe in Kombination mit Turboaufladung und Direkteinspritzung, sowie die Einbindung biogener Kraftstoffkomponenten in den Kraftstoff als notwendig angesehen, um sehr hohe Downsizingraten umsetzen zu können und beste CO₂-Werte zu erreichen. Diese starke Integration moderner Techniken verursacht neben erheblichen Kosten einen erheblichen Steuerungsaufwand im Motor, der sich in ein noch komplexeres Gesamtantriebskonzept integriert.

Bis heute konnten sich vollvariable Ventilsteuerungen auf dem Markt aufgrund des Herstellungsaufwands und der Komplexität der Ansteuerung nur begrenzt durchsetzen. Die Kostensituation wird

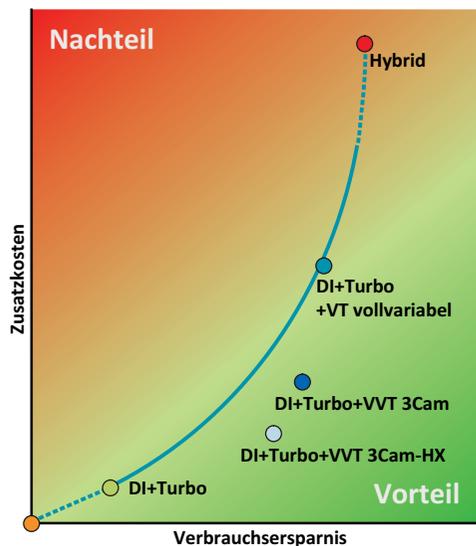


Bild 1 Verbrauchspotenzial verbrennungsmotorischer Antriebe und Hybride

sich mit zunehmender Hybridisierung und Elektrifizierung von PKW-Antrieben weiter verschärfen.

Durch gezielte Kopplung und Festlegung von Eigenschaften variabler Ventiltriebe in der Entwicklung ist es möglich, in Herstellung und Ansteuerungsaufwand sehr kostengünstige variable Ventiltriebssysteme darzustellen, die ohne wesentliche Veränderung der Motorkonstruktion in kleinen, kostengünstigen Motoren mit hohem CO₂-Potenzial eingesetzt werden können. Der Beitrag soll aufzeigen, welche Eigenschaftskombinationen im Ventiltrieb wesentlich das CO₂-Potenzial hochaufgeladener Ottomotoren bestimmen.

Spritsparende Motoren der neuen Generation erfordern mechanisch variable Ventiltriebe mit den Freiheitsgraden bekannter Continuously Variable Valve Lift (CVVL) Systeme und der Einfachheit eines mechanischen Schaltsystems wie dem Audi 2-Punkt Schieberockensystem.

Anforderungen und Potenziale variabler Ventiltriebe

Variable Ventiltriebe ermöglichen die Anpassung der Ventilhubfunktion an den Betriebszustand des Motors.

Der weiterhin zunehmende Marktdruck fokussiert die globalen Anforderungen des Automobilherstellers an ein variables Ventiltriebssystem auf:

- Weitestgehende Ausschöpfung des theoretisch maximalen CO₂-Potenzials
- Sehr kostengünstige Herstellbarkeit
- Geringste Einbußen des CO₂-Potenzials in der Fahrzeugapplikation unter Berücksichtigung der Fahrbarkeit
- Minimale Eingriffe in die Motorkonstruktion
- Geringe Systemkomplexität
- Kompatibilität mit immer kompakteren Motorkonstruktionen
- Verwendbarkeit in einem skalierbaren Antriebsbaukasten, d. h. Zukunftsfähigkeit des Konzeptes auch bei zunehmend starker Elektrifizierung des Antriebsstranges

Neben den Anforderungen an die Ventilhubfunktion zur Steuerung eines einzelnen Zylinders existieren aus dem gesamten Antriebssystem weitere Anforderungen, die berücksichtigt werden müssen:

- Gleichverteilung zwischen Zylindern
- Sensitivität der Einstellungen gegenüber Toleranzen
- Präzisionsanforderungen an die Steller, zeitliche Koordination der Steller im transienten Fahrbetrieb
- Umschaltung zwischen verschiedenen Einstellstrategien infolge unterschiedlicher Betriebsanforderungen → Hysteresen
- Spezifische Anforderungen in Steuerung, Regelung, Sensierung, OBD, Kommunikation mit anderen Systemen
- Emissionsauswirkungen
- Anforderung zu Start, Notlauf
- Weitere Anforderungen wie Bauraum, Fertigungsanforderungen, Öldruckbedarf, eingebrachte elektrische Lasten, Kosten, Entwicklungsaufwand, Entwicklungsrisiken, etc.

Das Konzept

Das Grundelement eines stufenlosen Schieberockensystems – im Folgenden 3Cam genannt – stellt

ein Nocken mit axial stufenlos veränderlicher Kontur dar, eine Antwort auf die genannten Anforderungen an ein modernes Ventiltriebssystem. Der zusätzlich zur Rotation axial bewegliche Nocken wird mit einem zylinderkopffesten Abgriff kombiniert, um die unterschiedlichen Ventilhub- und Ventilöffnungsauern zu erzeugen.

Im Gegensatz zum diskreten Schieberockensystem sind alle Nocken eines Zylinderkopfes fest auf einer Nockenwelle angeordnet. Die axiale Bewegung der Nockenwelle wird mit nur einem elektrischen Verstellsystem umgesetzt. Die als 3Cam-HX bezeichnete Variante sieht speziell eine feste Kopplung von Hub und Phasenlage einlassseitig vor. Hub und Phase werden also durch einen einzigen Steller gesteuert.

Zur Auslegung des in diesem Beitrag vorgestellten Systems und zur Ermittlung der gezeigten Potenziale der variablen Ventilsteuerungen wurde eine Ladungswechselstudie eingesetzt. Berechnungen wurden mit Hilfe des Programmpaketes GT-Power durchgeführt auf Basis eines abgeglichenen Modells eines turboaufgeladenen 4-Zylinder-Reihen-Ottomotors mit etwa 1,5 Litern Hubraum. Gezeigt wird das Verbrauchspotenzial durch Einsparung von Ladungswechselsarbeit bei konstanter Verbrennung. Das Ladungswechselsystem ist – bis auf die Ventilhubfunktionen – unverändert vom drosselgesteuerten Basismotor übernommen. Die Ventilhubfunktionen werden aus Hubscharen ausgewählt, die mit dem in diesem Beitrag beschriebenen variablen

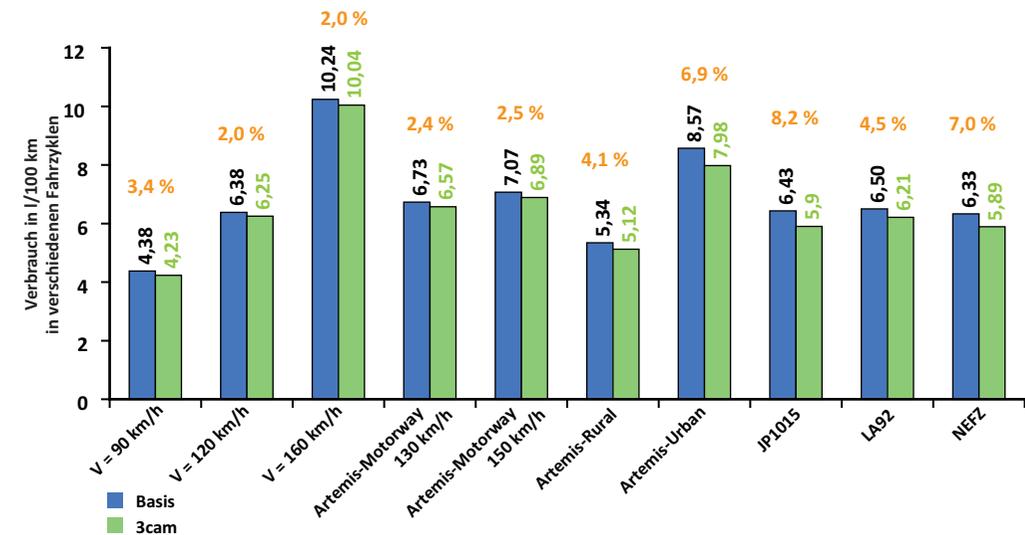


Bild 2 Verbrauch in l/100km in verschiedenen Fahrzyklen, Betrachtungsrahmen umfasst ausschließlich den Ladungswechselverbrauchsanteil

Ventiltriebssystem tatsächlich realisiert werden. Auf diese Weise wurden – mechanisch mögliche – in Hub und Lage optimierte Hubfunktionen ermittelt. Gleichzeitig wurde das Verbrauchspotenzial einer Ventilsteuerung bestimmt, die in der Lage ist diese Hubfunktionen einzustellen.

Die berechneten stationären Ergebnisse wurden auf den Verbrauch in verschiedenen Fahrzyklen für ein Fahrzeug der Kompaktklasse mit 1300 kg Fahrzeuggewicht und manuellem Getriebe hochgerechnet (Bild 2). Die stationär ermittelten Vorteile im Ladungswechsel führen im NEFZ zu einem Vorteil von

7,0 %. Der Vergleich unterschiedlicher Zyklen zeigt, dass für das stufenlos variable System Vorteile in einem weiten Kennfeldbereich bestehen, die an der Vollast mit ca. 2 % beziffert werden können.

Kontinuierlich variable Ventiltriebssysteme stehen in technischer Konkurrenz oder auch Ergänzung mit anderen ventiltriebsseitigen Maßnahmen zur Verbrauchsreduzierung wie Phasenstellern, 2-Punkt Hubumschaltern mit und ohne Zylinderabschaltung oder auch 3-Punkt Hubumschaltern mit Zylinderabschaltung (ZAS-Evo) als dritte Schaltstufe, sowie Kombinationen dieser

	Basis	3Cam	3Cam-HX	2-Pkt. Schalter	ZAS	ZAS E+A	ZAS Evo	
Konfiguration	3Cam	x	x					
	Einlassphasensteller	x	x	x	x	x	x	
	Auslassphasensteller	x	x	x	x	x	x	
	2-Punkt Schalter			x			x	
	Zylinderabschaltung Einlass				x	x	x	
	Zylinderabschaltung Auslass					x	x	
Zusatzmerkmale	Applikation	Basis	o	++	+	o	o	--
	Systemkosten	Basis						
	Peripheriekosten	Basis	nur Maskierung	nur Maskierung		Vibrations-, Schwingungsdämpfung, Abgasanlage	Vibrations-, Schwingungsdämpfung, Abgasanlage	Vibrations-, Schwingungsdämpfung, Abgasanlage
	Gesamtkosten	Basis						
Verbrauchspotenziale	Zusatzpotenzial aus Verbrennung	Basis	1-2 %	0-1 %	0%-0,5 %	0% enthalten in LDW	0% enthalten in LDW	0%-0,5 %
	zus. Optimierungspotenzial (Reibung, Ansaug und Abgassystem)	Basis	0-1 %	0-1 %	0,5 %	0,5 %	0-1 %	0-1 %
	NEFZ, Ladungswechselpotenzial, gerechnet	Basis	7,0 %	6,0 %	3,8 %	1,5 %	5,1 %	6,1 %
	Gesamtpotenzial NEFZ	Basis	9,0 %	7,0 %	4,5 %	2,0 %	5,6 % 7,1 %*	6,9 %/8,4 %*
	Zukunftsfähigkeit, (DI mager, Hochaufladung, AGR, 3-Zyl.)		++	++	+	-	-	o
Gesamtbewertung		+	++	o	--	o	-	

■ positiv ■ neutral ■ negativ

Bild 3 Verbrauchspotenziale verschiedener Ventiltriebsvariabilitäten im Vergleich (*: inkl. Zusatzpotenzial bei Abschaltung im Leerlauf mit Stopp-Start System)

Technologien. Um eine vergleichende Bewertung zu ermöglichen wurden unterschiedliche Technologien mit gleicher Methodik verglichen (Bild 3).

Das betrachtete zweistufige Hubumschaltssystem mit asymmetrisch ausgelegten Hubfunktionen erreicht im Ladungswechsel ein beachtliches Einsparpotenzial von 3,8 % im NEFZ bei optimaler Anpassung der Hubfunktionen an den Zyklus. Hinzu kommen Vorteile in Gemischbildung und Verbrennung, die ein gesamtes Potenzial von bis 4,5 % erwarten lassen. Der Kennfeldbereich in dem das Stufensystem wirkt, ist naturgemäß kleiner als der Bereich in dem ein kontinuierlich variables System wirken kann. Allerdings werden in diesem Bereich und bei Konzentration auf dieses Teillastpotenzial sehr gute Werte völlig analog zum kontinuierlich variablen System erreicht.

Das als 3Cam-HX bezeichnete, stufenlose Schiebennockensystem verzichtet auf den einlassseitigen Phasensteller und sieht anstelle dessen eine feste Kopplung von Hub und Phase vor. Das System verliert nur in geringem Maße an Leistungsfähigkeit gegenüber dem völlig freien System 3Cam mit allen Einstellmöglichkeiten. In der Gesamtwertung spiegelt sich der Applikationsvorteil aufgrund der festen Kopplung zwischen Hub- und Phasenlage wieder. Dem geringen, rein stationären Verbrauchsnechtteil steht eine erhebliche Vereinfachung der Steuerung und Applikation gegenüber, die in der Praxis den stationären Nachteil voraussichtlich mehr als kompensieren kann.

Bild 4 zeigt am Beispiel eines Lastsprungs den Applikationsvorteil, der in einer Kopplung von Hub- und Phasensteller liegt. Bei der üblichen Trennung der Funktionen bestimmt der langsamere Phasensteller die maximal nutzbare Dynamik des Hubstellers. Die Drosselklappe greift über den Stellvorgang korrigierend ein. Bei einer Kopplung von Hub- und Phase ist die in der Entwicklung festgelegte Kombination in jedem auch transienten Betriebszustand gegeben. In der Praxis wird der Dynamikvorteil eines schnellen Stellers mit Phase- und Hubkopplung verstärkt durch einen Effizienzvorteil, indem Fehleinstellungen und Zündwinkeleingriffe vermieden werden. Die Systemauslegung kann bei aufgeladenen Motoren auch die Ladedruckregelung einbeziehen.

Aus diesen Gründen stellt das stufenlose Schiebennockensystem mit Phasen-Hub Kopplung (3cam-HX) eine sehr effiziente Laststeuerung für kostengünstige Downsizing-Verbrennungsmotoren sowie für Hybridantriebe dar, bei denen eine hohe Leis-

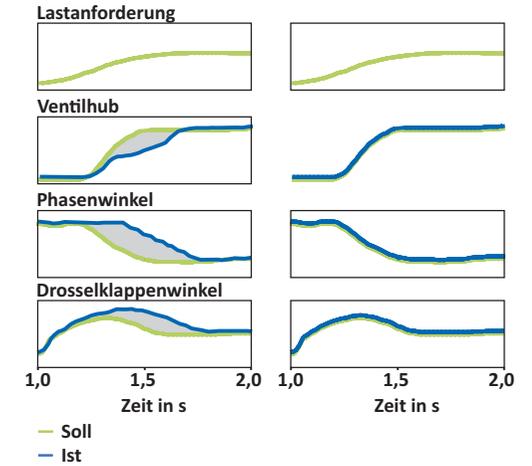


Bild 4 Linke Bildhälfte: Lastsprung bei separatem Hub- und Phasensteller, rechte Bildhälfte: Applikationsvorteil durch 3Cam-HX

tungsspreizung des Verbrennungsmotors zur Verbesserung der Fahrbarkeit genutzt wird.

Das Beste aus zwei Welten kombiniert

Entsprechend des aufgezeigten Anforderungsprofils wird nach einer mechanischen Lösung gesucht, die die gestellten Anforderungen möglichst optimal umsetzt.

Einen guten Überblick über die während der Entwicklung und in der Serienproduktion zu lösenden Herausforderungen für ein mechanisch vollvariables Ventiltriebssystem geben die Fachartikel zur BMW-Valvetronic aus [1] und [2].

Stufenlose Schiebennockenventiltriebe grenzen sich gegenüber den klassischen CVVL Systemen ab. Gemeinsames Merkmal von Mehrkörper-CVVL Lösungen sind eine komplexe mehrgelenkige Übertragungskinetik (Kulissensysteme) sowie die Trennung von Verstellwelle und Ventilabgriffsbetätigungswelle (Zweiwellendesign).

Eine Lösungsvariante stellt der stufenlose 3Cam Schiebennockenventiltrieb dar. Dieser ist mechanisch sehr übersichtlich aufgebaut. Die Integration ist in einer Vielzahl von Zylinderköpfen nahezu bauraumneutral möglich. Durch den geringen Eingriff in den Basiszylinderkopf ist es möglich diese Lösung auf vorhandenen Serienmontagelinien zu montieren.

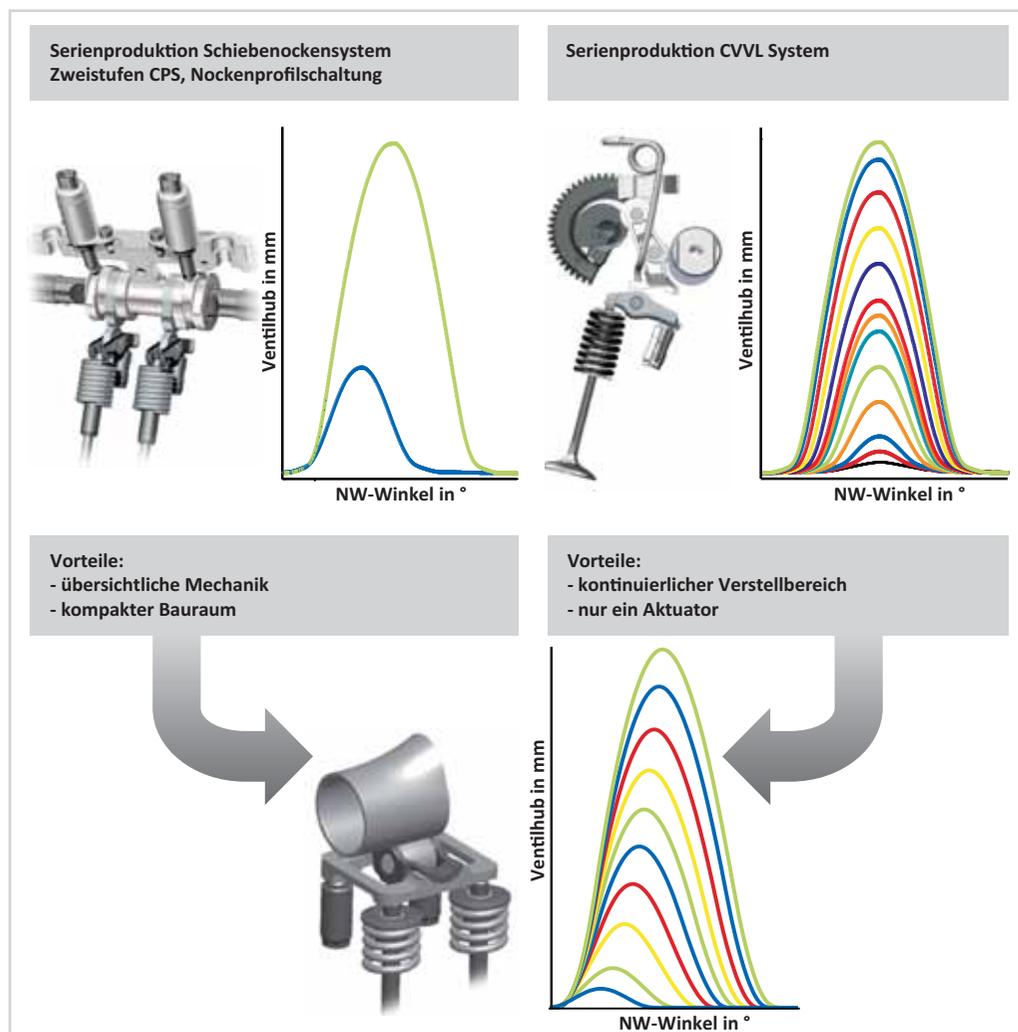


Bild 5 Das Beste aus zwei Welten kombiniert

Ziel der Entwicklung des stufenlosen Schiebennockenventiltriebs ist die Zusammenführung der positiven Merkmale eines klassischen CVVL Systems und eines 2-Punkt Schiebennockensystems. Das 2-Punkt Schiebennockensystem weist einen übersichtlichen mechanischen Aufbau auf und kann daher relativ einfach in einen bestehenden Zylinderkopf integriert werden. Jedoch sind nur wenige Ventilhubkurven durch Schalten darstellbar. Weiterhin wird für jede Nockenbaugruppe ein Aktuatorpaar benötigt um den zylinderindividuellen Schaltvorgang durchzuführen. Bild 5 zeigt die Verwandtschaft des stufenlosen Schiebennockenwellenverstellsystems zu einem CVVL und einem 2-Punkt Schiebennockenverstellsystem.

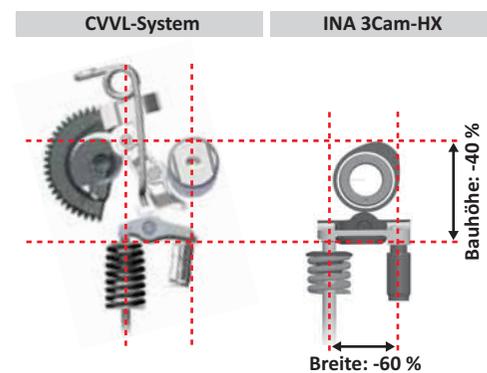


Bild 6 Bauraumvergleich Serien CVVL-System nach [1] und kontinuierliches Schiebennockensystem

Der wesentliche Vorteil des stufenlosen Schiebennockenventiltriebs liegt im Bauraumbedarf. Während das CVVL System prinzipbedingt eine Reihe zusätzlicher Bauteile benötigt, wächst auch der entsprechende Platzbedarf im Zylinderkopf. Im Bild 6 sind die beiden Konzepte ohne den jeweiligen Aktuator miteinander verglichen.

Ein altes Prinzip neu entwickelt

Die Idee eines stufenlosen Schiebennockenventiltriebs existiert seit langer Zeit. Die ersten Entwürfe stammen von Titolo [5]. Einzelne Motorenhersteller haben sich in der Vergangenheit bereits mit dem Konzept „Stufenloser Schiebennocken“ beschäftigt, jedoch gab es bis heute keine Serienanwendungen.

Mit den Schaeffler Kompetenzen in dem Bereich Großserienfertigung von Präzisionskomponenten und Wälzlagern kommen bei der Entwicklung des 3Cam Ventiltriebs einige wesentliche Neuerungen zum Einsatz, die Defizite ursprünglicher Lösungen in den Bereichen Toleranzgüte, Reibung, Lebensdauer und Systemdynamik auflösen:

- Ablage des gesamten Ventilhubkennfeldes auf dem Nocken
- Zusammenfassung der Ventilgruppen eines Zylinders (Einlass, Auslass); Betätigung beider Einlass oder Auslassventilen mit nur einem Nocken
- hohes Übersetzungsverhältnis von Verschiebeweg zu Hub für hohe Güte an Zylindergleichverteilung im Leerlauf
- konsequenter Einsatz von wälzgelagerten Komponenten
- Kontaktpaarung Nocken-Abgriff mittels wälzgelagerter Rolle
- wälzkörpergelagerte Nockenwellenphasenverstellung (HX-Merkmal)

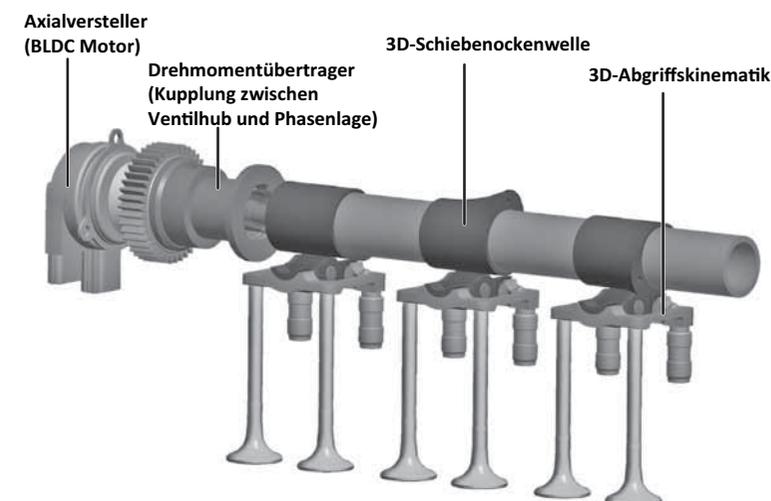


Bild 7 INA 3Cam-HX Ventiltrieb am 3-Zylindermotor

- hydraulischer Ventilspielausgleich
- linienförmiger Kontakt zwischen Nocken und Abgriffsrolle
- reibungsminimierte Abstützung der prinzipbedingten Axialkraft des Nockens
- elektrischer Axialversteller mit BLDC Motor inkl. Positionssensorik
- mechanisch abhängige oder unabhängige Kopplung zwischen Ventilhub und Phasenlage auch mit separatem Nockenwellenversteller kombinierbar
- exakte Verstellung bei Anlassdrehzahl (Motorstart) möglich

Gesamtsystem

Der INA 3Cam-HX Ventiltrieb besteht aus folgenden vier Baugruppen (Bild 7):

- 3D-Schiebennockenwelle
- 3D-Abgriffskinetik
- Drehmomentüberträger
- Axialversteller

Die Kraftübertragung vom Nockenwellenantriebsrad auf die Nockenwelle erfolgt über den Drehmomentüberträger. Dieser ist im Inneren mit Wälzkörpern ausgestattet und sorgt für eine reibungsarme und effiziente Verstellung der Nockenwellenaxialposition. Durch diese Stellgröße werden bei der HX-Variante gleichzeitig Ventilhub und Phasenlage beeinflusst.

Der elektrisch kommutierte Elektromotor ist über einen reibungsoptimierten Kugelgewindetrieb an die Schiebenockenwelle angebunden. Die Schiebenockenwelle trägt vier Nocken mit denen jeweils zwei Ventile eines Zylinders betätigt werden. Die 3D-Abgriffskinematik verbindet Nocken und Ventil kraftschlüssig. Hierzu ist das innenliegende Bauteil, der sogenannte Wipphebel, winkelbeweglich im äußeren Schleppebel aufgenommen.

Durch die hohe Mechanikkompetenz bei Schaeffler können alle mechanischen Teile des 3Cam-HX Systems sehr wirtschaftlich hergestellt werden. Für die komplexe Geometrie des Schiebenockens wurde ein eigenes, sehr wirtschaftliches Auslegungs- und Fertigungsverfahren entwickelt, um die für Anwendungen im Automobil typische Lebensdauer und hohe Toleranzhaltigkeit eines konventionellen Ventiltriebs zu erreichen.

3D-Schiebenockenwelle

Der Nocken des INA 3Cam-HX Systems ist Zentralstück des Ventiltriebs. Auf der Oberfläche des Nockens sind sämtliche Hubinformationen abgelegt. Die Kontur bildet gemeinsam mit der Nockenrolle eine in der Entwicklung aufeinander abgestimmte Einheit. Das bedeutet, dass bei der Konstruktion des Nockens die Rollengeometrie berücksichtigt wird. Mit Hilfe eines speziellen bei Schaeffler entwickelten Berechnungs- und Konstruktionsverfahrens ist es möglich geworden eine Nocken-Rollenpaarung zu erzeugen, die eine Linienberührung zwischen beiden Partnern in der Hubphase ausbildet. In der Grundkreisphase, in der die Last auf den Nocken gering ist, entsteht eine Berührellipse zwischen dem Nocken und der Nockenrolle. Die Linienberührung trägt der Anforderung nach hoher Lebensdauer ausreichend Rechnung.

Das Auslegungsverfahren berücksichtigt die Schleiftechnologie des Nockens. Mit einem eigens hierfür entwickelten und zum Patent angemeldeten Schleifverfahren ist es möglich, die Oberfläche der Nocken sehr wirtschaftlich mit kurzen Taktzeiten zu fertigen.

Für die Herstellung der gebauten Nockenwelle

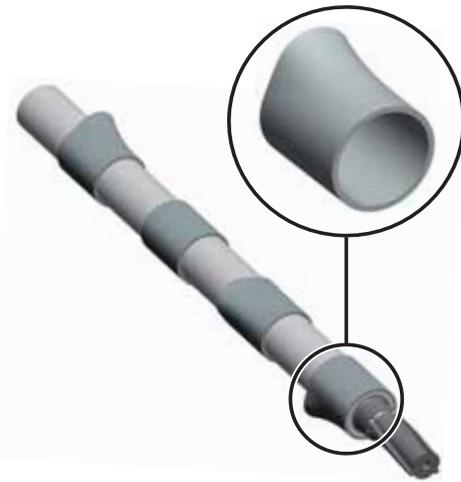


Bild 8 Nockenwelle und Einzelnocken

kann auf herkömmliche Fertigungsverfahren aufgesetzt werden.

Unter Anwendung der beschriebenen Auslegungskette werden für die aktuelle Auslegung Ventilhubkurvenscharen mit einem Ventilhubverstellbereich von 0,4 mm bis 9 mm und einem Öffnungsdauerspreizungsbereich von 120° KW bis ca. 260° KW sowie ein „Nullhub“ realisiert. Die Flächenpressungen im Nocken-Rollenkontakt werden durch die linienförmige Berührung der Kontaktpartner auf einem über die Lebensdauer zulässigen Niveau gehalten. Die größte Beanspruchung tritt bei Motordrehzahlen von 7000 1/min und maximalem Ventilhub auf.

In der linken Abbildung von Bild 9 ist die Ventilhubkurvenschar des Versuchsträgernockens gezeigt. Der Nocken wurde sehr ähnlich zur Kurvenschar von CVVL Systemen konstruiert, um bei späteren Ventiltriebsdynamikuntersuchungen einen Vergleich des

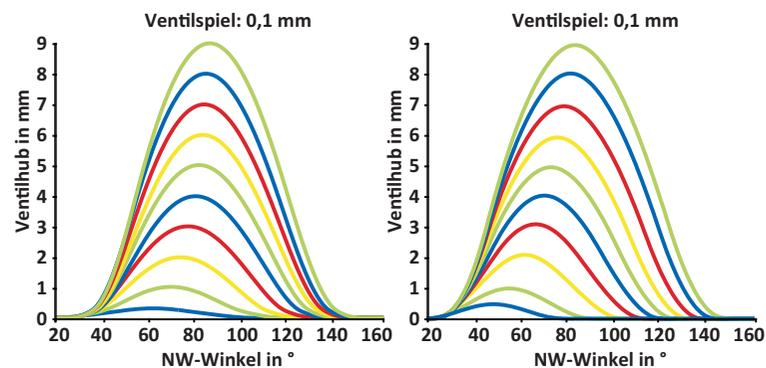


Bild 9 Zwei mögliche Ventilhubkurvenscharen des INA 3Cam Nockens

dynamischen Verhaltens der CVVL- und der Schiebenockenkinematik durchführen zu können.

Die entwickelte Auslegungs- bzw. Schleiftechnologie lässt eine weitere Reduzierung der Öffnungsdauer im unteren Ventilhubbereich zu. Die rechte Abbildung von Bild 9 zeigt einen solchen Nocken. In bestimmten Kontaktbereichen des Nockens muss jedoch auf eine vollständige Linienberührung verzichtet werden. Die zu erwartenden erhöhten Flächenpressungen in den kritischen Bereichen des Nocken-Rollenkontaktes müssen hinsichtlich der Lebensdauerbeeinflussung genauer untersucht werden.

Die vorhergehend gezeigten Nockenkonturen können mit dem Schaeffler Fertigungsablauf wahlweise auf das Einzelteil oder auf die komplette Nockenwelle aufgebracht werden. Für die ersten internen Versuchsnockenwellen wurden bereits endbearbeitete Nocken mit einem Trägerrohr zu einer Vierzylindernockenwelle gefügt. Für das Fügen der Nocken auf das Trägerrohr können grundsätzlich die bekannten Welle-Nabe Fügeverfahren eingesetzt werden. Die Nockenwelle wird zusätzlich mit dem Innenteil des Drehmomentübertragers zu einer Gesamtnockenwelle komplettiert. Mit der gebauten Ausführung konnte eine Gewichtsreduzierung im Vergleich zur Basisnockenwelle realisiert werden. Das Gesamtgewicht der kompletten 3Cam-Vierzylindernockenwelle beträgt etwa 1,2 kg.

3D-Abgriffskinematik

Für das Abgriffselement kommt ein rahmenförmiger Schleppebel mit innen liegendem Wipphebel und nadelgelagerter Nockenrolle zum Einsatz. Der Schleppebel stützt sich am hinteren Ende auf zwei hydraulischen Ventilspielausgleichselementen ab.

Grundsätzlich werden im Schiebenockenventiltrieb zwei Ventile von einem Nocken betätigt, um durch den Einsatz nur eines Nockens den Bauraum für

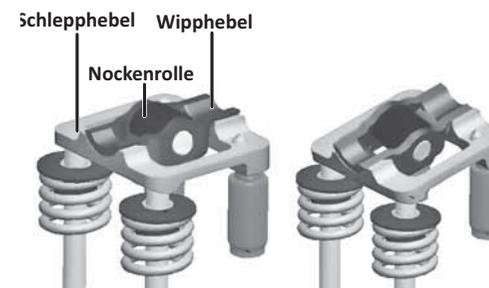


Bild 10 Abgriffselement des stufenlosen Schiebenockenventiltriebs

eine hohe Übersetzung von Verschiebeweg zu Ventilhub zu erreichen.

Die Profilierung der Nockenrolle ermöglicht eine gute Anpassung auf den Nocken im Hubbereich. Die entstehende, gemeinsame Berührlinie begrenzt die Kontaktflächenpressung. Die Führung zwischen Wipp- und Schleppebel bildet das Gelenk für den notwendigen Bewegungsfreiheitsgrad. Eine weitestgehende Axiallastfreiheit der nadelgelagerten Nockenrolle wird dadurch gewährleistet, dass die Last des Schiebenockens immer senkrecht zur Rollenachse wirkt.

Bei jedem Nockenhub wirkt eine Kraftkomponente parallel zur Nockenwelle, die vom Abgriffselement übertragen werden muss. Die Ventilspielausgleichselemente nehmen neben den Längskräften auch diese Querkräfte aus der Hubbewegung auf. Die beiden Ventile bleiben folglich querkräftfrei.

Im Vergleich zur Basis ersetzen je ein Wipp- und ein Schleppebel, jeweils zwei Schleppebel. Dadurch kommt es nur zu einer geringfügigen Erhöhung von Masse und Massenträgheitsmoment im Vergleich zur Basis.

Drehmomentübertrager

Der Drehmomentübertrager nimmt das Ketten- oder Riemenrad auf und überträgt das eingeleitete Drehmoment auf die Nockenwelle. Im konventionellen Ventiltrieb übernimmt die Nockenwelle die axiale Positionsdefinition des Kettenrades. Da im stufenlosen Schiebenockenventiltrieb die Nockenwelle axial verschiebbar ist, muss das Antriebsrad zum Außenteil des Drehmomentübertragers (Lagerbuchse) im Zylinderkopf axial gelagert werden. Zwischen Außen- und Innenteil befindet sich eine wälzkörpergelagerte Führung, um eine leichtgängige axiale Verschiebung unter der Last des Nockenwellenantriebsmomentes zu gewährleisten.

Beim INA 3Cam-HX Ventiltrieb ist die wälzgelagerte Führung als Helix ausgeführt, um die oben genannte vorteilhafte Kopplung zwischen Hub und Phase umzusetzen. Der Schrägungswinkel kann entsprechend der thermodynamischen Strategie variabel gewählt werden. Als Kopplungskörper dienen konventionelle Wälzlagerkugeln, die sich in einer speziell profilierten Laufbahn bewegen, um eine maximale Last bei minimierter Reibung übertragen zu können. Eine aus der Wälzlagerfertigung bekannte Zupaarung von Wälzkörpern ermöglicht eine quasi spielfreie Drehmomentübertragung des Nockenwellenantriebsmomentes.

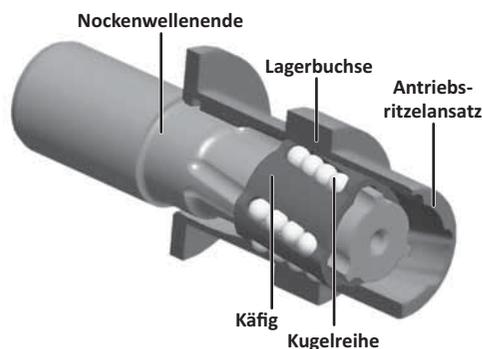


Bild 11 Drehmomentübertrager und NW-Versteller des 3Cam-HX Ventiltriebs

Im internen Versuchsträgerzylinderkopf wurde ein exemplarischer Verstellwinkel von 44° KW in Richtung „früh“ realisiert. Der Bereich kann aus fertigungstechnischer Sicht bis auf ca. 100° KW erweitert werden.

Axialversteller

Die Konstruktion des Axialverstellers erfüllt folgende Randbedingungen:

- kein zusätzlicher Bauraumbedarf im Vergleich zum Serienzylinderkopf
- keine Veränderung des Versuchszylinderkopfes
- hoher Wirkungsgrad
- elektrisch betätigt

Die Wandlung der Drehbewegung in eine Längsbewegung erfolgt mit hohem Wirkungsgrad durch einen spanlos hergestellten Kugelgewindetrieb. Der antreibende Elektromotor ist bürstenlos ausgeführt. Durch die Verwendung von Magneten aus seltenen Erden baut der Antriebsmotor besonders kompakt.

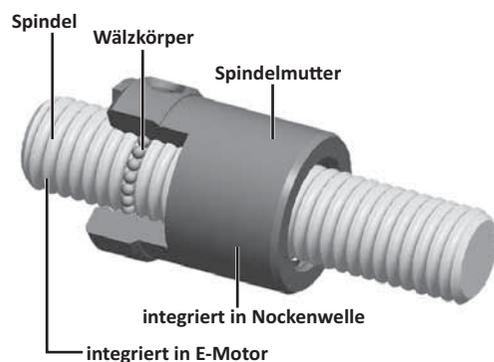


Bild 12 Axialversteller des 3Cam-HX Ventiltriebs

Der Axialversteller des 3Cam-HX ist als mitdrehendes System ausgeführt. Der Elektromotor dreht folglich permanent mit Nockenwellendrehzahl und beschleunigt oder verzögert die Gewindespindel kurzzeitig, um eine Axialverstellung zu erreichen. Durch diese Bauweise konnte der Bauraumbedarf des Axialaktuator für den Versuchsträger soweit reduziert werden, dass die 3Cam-HX-Adaption an den Zylinderkopf eine Längenreduzierung des Gesamtzylinderkopfes von 3 mm im Vergleich zur Basis zur Folge hat. Der Basiszylinderkopf ist mit einem konventionellen Ventiltrieb und hydraulischem Phasenversteller ausgestattet.

Versuchsergebnisse

Am internen Versuchszylinderkopf werden diverse Messungen zum Nachweis der Leistungsfähigkeit des 3Cam-HX Ventiltriebs durchgeführt. Die ausgewählten Bewertungsgrößen sind:

- Verstellzeiten
- Regelgenauigkeit
- Leistungsbedarf im stationären und dynamischen Betrieb
- Ventiltriebsdynamik

Elektrische Leistungsaufnahme und Verstelldynamik

Der Leistungsbedarf des Verstellsystems wurde durch Messung des vom Stellmotor aufgenommenen Stroms bestimmt. Werte wurden für verschiedene Drehzahlen und unterschiedlich große Ventilhubverstellsprünge ermittelt.

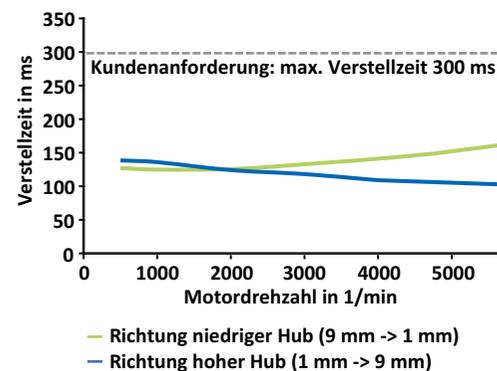


Bild 13 Verstellzeiten des 3Cam-HX Ventiltriebs zwischen 1 mm und 9 mm Ventilhub

Im stationären Betrieb nimmt der Elektromotor, abhängig von der Kurbelwellendrehzahl, im Mittel 0,8 A auf. Dieser Wert entspricht in etwa dem Haltestrom für das Schaltventil eines hydraulischen Nockenwellenverstellers. Für den dynamischen Betrieb wird der Spitzenstrom am Stellmotor auf 40 A begrenzt. Dieser Spitzenstrom liegt damit auf halbem Niveau des akzeptablen Wertes nach [2] und ist ausreichend, um eine hohe Verstelldynamik zu erreichen.

Das Bild 13 zeigt das Ergebnis von Verstellspungmessungen am geschleppten Zylinderkopf zwischen 1 mm und 9 mm Ventilhub in Abhängigkeit von der Kurbelwellendrehzahl im gesteuerten Betrieb. Alle Verstellsprünge sind innerhalb von deutlich weniger als 200 ms möglich.

Diese Verstellzeiten zeigen die Leistungsfähigkeit des Verstellsystems ohne den Einfluss eines Lage-reglers. Die Messwerte liegen im gesamten Drehzahlbereich deutlich unter der Kundenakzeptanzgrenze [2]. Geringe Verstellzeiten sind im Hinblick auf die Fahrdynamik und Spontaneität äußerst hilfreich, da beim 3Cam-HX System Hub und Phase synchron in dieser Zeit verstell werden.

Bild 14 zeigt einen dynamischen Verstellzyklus am Zylinderkopf. Zur Lageregelung wird ein Prototypensystem mit einfachem PID Regler eingesetzt. Es zeigt sich, dass die hohe Dynamik durch den Regler beherrscht wird und auch die Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Lage minimal sind. Dieses spiegelt die sehr geringe Reibungshysterese in der mechanischen Strecke wieder.

Zusammenfassung

Das kontinuierliche Schiebenockensystem 3Cam-HX ist ein äußerst kompakt bauender, dynamisch verstellender, variabler Ventiltrieb, der die Vorzüge eines zweistufigen Schiebenockensystems mit denen eines kontinuierlich verstellenden mechanischen CVVL-Ventiltriebs verbindet. Neben der möglichen nachträglichen Ausrüstung eines bestehenden Zylinderkopfes ragt auch die aktuatorische Einfachheit

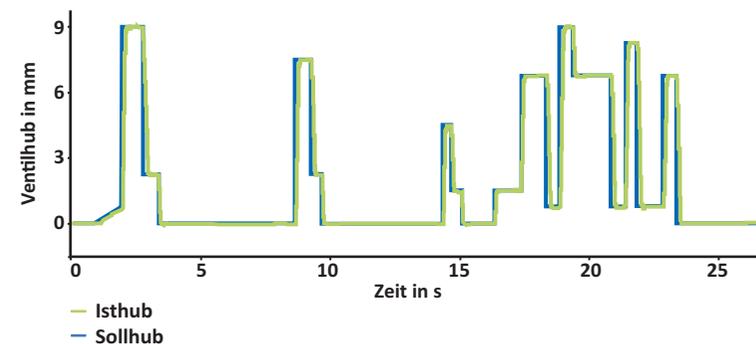


Bild 14 Dynamischer Verstellzyklus (Messung)

und die mögliche, sehr effektive Kopplung von Hub und Phase, heraus. Diese Funktionalität bietet eine große Applikationsvereinfachung und hohe Effizienz im praktischen transienten Fahrbetrieb. Geringe Systemkosten, unter anderem durch Entfall eines separaten Nockenwellenphasenverstellers, sorgen für ein attraktives Kosten-Nutzen Verhältnis.

Das sehr gute Aufwand-Nutzen Verhältnis lässt auch Einsätze in sehr sparsamen, hochaufgeladenen Motoren mit Downsizing und Antriebskonzepten mit teilelektrifiziertem Antrieb, bei denen ein besonders hoher Kostendruck auf dem Motor herrscht, attraktiv erscheinen.

Literatur

- [1] Klaus, B.; Drexler, G.; Eder, T.; Eisenkölbl, M.; Luttermann, C.; Schleusener, M.: Weiterentwicklung der vollvariablen Ventilsteuerung BMW-Valvetronic, ATZ 09/2005, S. 650ff
- [2] Unger, H.; Schneider, J.; Schwarz, C.; Koch, K.-F.: Die VALVETRONIC – Erfahrungen aus 7 Jahren Großserie und Ausblick in die Zukunft, 29. Internationales Wiener Motorsymposium 2008, S. 319ff
- [3] Wurms, R.; Budack, R.; Böhme, J.; Dornhöfer, R.; Eiser, A.; Hatz, W.: Der neue 2.0 L TFSI mit Audi Valvelift System für den Audi A4 – die nächste Generation der Audi Turbo FSI Technologie, 17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2008, S. 1078
- [4] BMW Techniklexikon – Valvetronic, www.bmw.de
- [5] Titolo, A.: Die variable Ventilsteuerung von FIAT, MTZ 47 (1986) 5