

15

Quo vadis hydraulischer Nockenwellenversteller?

Andreas Strauß
Jens Schäfer
Joachim Dietz
Michael Busse
Mathias Boegershausen

Elektrifizierung im Kraftfahrzeug

Mit der ständigen Weiterentwicklung elektrischer Komponenten und maßgeblich unterstützt durch die kontinuierlich gewachsenen Anforderungen zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauches hat die Elektrifizierung im Kraftfahrzeug in den letzten Jahren entscheidend an Bedeutung gewonnen.

Hydraulische Lenkhilfen wurden durch elektromechanische Systeme abgelöst, welche nur bei Bedarf mit Energie versorgt werden müssen. Am Verbrennungsmotor werden beispielsweise erste elektrisch angetriebene Wasserpumpen eingesetzt, um die Motorkühlung möglichst optimal auf den jeweiligen Betriebspunkt einstellen zu können.

Nun stellt sich die Frage, ob bei Nockenwellenverstellungssystemen (VCP - variable camshaft phasing) ein

ähnlicher Technologiewechsel von hydraulischen (HCP - hydraulic camshaft phasing) zu elektrischen Systemen (ECP - electromechanical camshaft phasing) stattfinden wird.

Anforderungen

Zur Beantwortung der Frage muss geprüft werden, welche Funktionen benötigt werden und mit welcher Lösung diese mit dem geringsten Aufwand dargestellt werden können. Das Lastdrehzahlkennfeld des Verbrennungsmotors eignet sich zur Beschreibung der wichtigsten Funktionen von Nockenwellenverstellungssystemen (Bild 1). In einem konstanten Betriebspunkt ist die Genauigkeit der Einstellung der gewünschten Steuerzeit (repräsentiert durch den Verstellwinkel α) von großer Bedeutung. Insbesondere zukünftige Brennverfahren, wie HCCI stellen sehr hohe Anforderungen an

die Genauigkeit. Im transienten Betrieb, beim Wechsel auf einen anderen Betriebspunkt im Kennfeld, ist die Verstellgeschwindigkeit zum Einstellen der neuen Steuerzeit wichtig. Dadurch wird z. B. die Qualität des Aufbaus des Motordrehmomentes beeinflusst. Zu geringe Verstellgeschwindigkeiten müssen bei der Motorapplikation durch Anpassung von Zündung und Einspritzung ausgeglichen werden. Das kann zu Nachteilen beim Verbrauch führen.

Eine weitere wichtige Funktion ist der Freiheitsgrad bei der Wahl der Steuerzeit für den Start des Verbrennungsmotors. Im Motorbetrieb werden zum Teil Steuerzeiten eingestellt, die für den Motorstart ungeeignet sind, deshalb sollen die gewünschten Steuerzeiten während des Anlassvorgangs möglichst stabil gehalten werden können. In Zukunft könnten darüber hinaus unterschiedliche Steuerzeiten für verschiedene Startbedingungen (z. B. heiß und kalt) wünschenswert sein.



Bild 3 HCP mit Zentralventil

möglicht das kontinuierliche Regeln des Nockenwellenverstellers.

Der Versteller ist in der vorgegebenen Basisposition, in einer frühen oder späten Steuerzeit, verriegelt. Dabei ist das Ventil stromlos geschaltet. Das Erreichen der Basisposition in Früh kann durch eine auf den Anwendungsfall ausgelegte Feder unterstützt werden.

Der Versteller ist durch einen Ketten- oder Riemensteuertrieb antreibbar.

Das VCP System mit Zentralventil (ZVEN) besteht aus einem Nockenwellenversteller in Drehflügelbauweise, einem Zentralventil und einem Zentralmagneten (Bild 3).

Der Magnet wird von dem Motorsteuergerät pulswidenmoduliert angesteuert und ist an den Motorölkreislauf angeschlossen und dient gleichzeitig zur Befestigung des Verstellers an der Nockenwelle. Das System ermöglicht das kontinuierliche Regeln des Nockenwellenverstellers.

Der Versteller ist in der vorgegebenen Basisposition, in einer frühen oder späten Steuerzeit, verriegelt und der Magnet ist stromlos geschaltet. Das Erreichen der Basisposition in Früh kann durch eine auf den Anwendungsfall abgestimmte Feder unterstützt werden.

Der Versteller ist durch einen Ketten- oder Riementrieb in Öl laufend antreibbar.

Aufbau von ECP und HCP

Systembeschreibung HCP

Das VCP System mit einem separaten Einsteckventil, einem sogenannten Cartridgeventil, besteht aus einem Nockenwellenversteller in Drehflügelbauweise und einem INA Proportionalmagnetventil (Bild 2). Diese Bauform repräsentiert die Standardbauweise.

Das Magnetventil wird von dem Motorsteuergerät pulswidenmoduliert angesteuert und ist an den Motorölkreislauf angeschlossen. Das System er-



Bild 2 HCP mit Cartridge

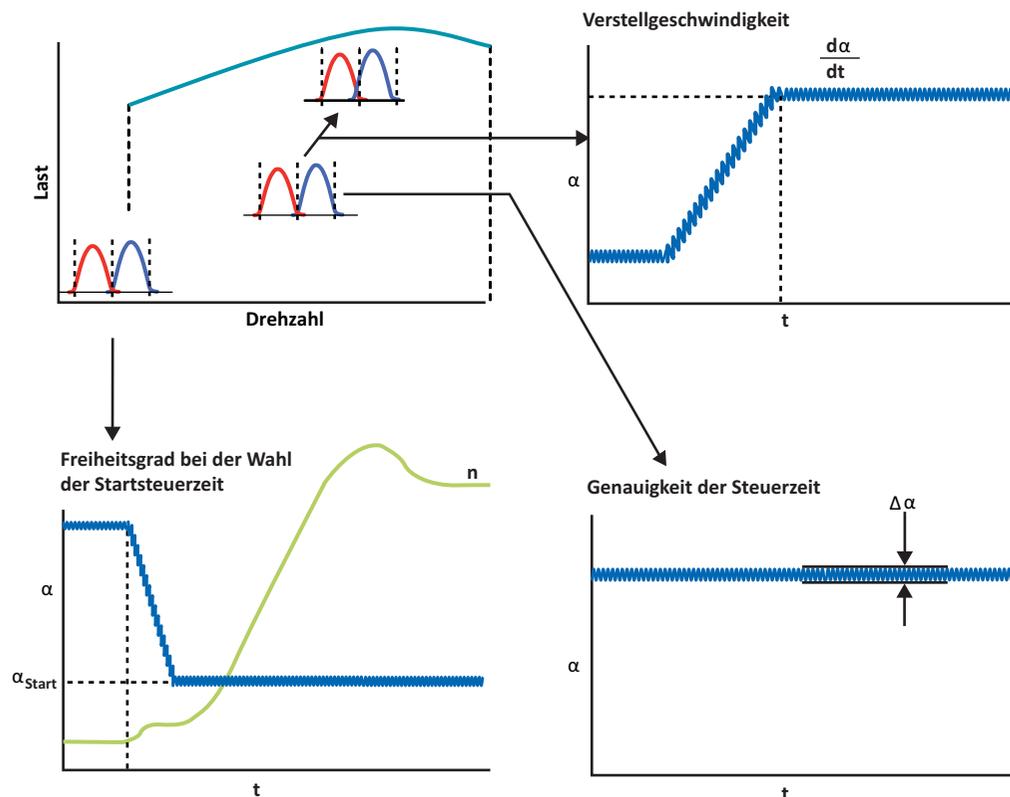


Bild 1 Funktionsanforderungen



Bild 4 Versteller mit ECP

Systembeschreibung ECP

Das ECP-System besteht aus einem Dreiwellenverstellgetriebe, welches in gleicher Weise wie ein hydraulischer Nockenwellenversteller an die Nockenwelle montiert wird. Die Getriebeabtriebswelle ist fest mit der zu verstellenden Nockenwelle verbunden. Die Kontrollwelle des Dreiwellengetriebes ist mit einem klein bauenden 12V-Elektromotor verbunden. Dieser verstellt den Phasenwinkel zwischen Kurbel- und Nockenwelle. Die dritte Welle des Verstellgetriebes bildet das Getriebegehäuse, welches fest mit Riemen- oder Kettenrad des Primärtriebes gekoppelt ist. Bild 4 zeigt die Anordnung.

$$\dot{\varphi} = 2\pi * \left(\frac{2n_{e_motor} - n_{engine}}{\text{Getriebeübersetzung}} \right) / 60$$

Soll ein konstanter Verstellwinkel gehalten werden, so muss die Abtriebswelle des Elektromotors mit Nockenwellen- bzw. Getriebegehäusedrehzahl rotieren. Soll eine Verstellung des Phasenwinkels erfolgen, so muss die Abtriebswelle des Elektromotors entsprechend der gewünschten Verstellrichtung schneller oder aber langsamer als das Getriebegehäuse drehen. Aus der Differenz der Drehzahlen von Abtriebswelle des Elektromotors bzw. Kontrollwelle des Dreiwellengetriebes (n_{e_motor}) und Getriebegehäuse (n_{engine}) kann die Verstellgeschwindigkeit

($\dot{\varphi}$ in °KW/s), nach folgender Gleichung gebildet werden worin n_{e_motor} und n_{engine} die Einheit 1/min haben. Typische Getriebeübersetzungen liegen im Bereich von 40:1 bis 100:1.

Systemvergleich

Hydraulische VCP Systeme mit Cartridge- oder mit Zentralventil und elektrische Nockenwellenverstellsysteme werden bezüglich des Potenzials zur Erreichung der Funktionsanforderungen und des erforderlichen Aufwandes gegenüber gestellt (Bild 5).

Die Verstellgeschwindigkeit von hydraulischen VCP Systemen ist maßgeblich durch die Leistungsfähigkeit des Motorölsystems bestimmt. Lösungen mit einer zentralen Anordnung des Steuerventils bieten bei geringfügig höherem Aufwand verbesserte Möglichkeiten zur Entdrosselung, als Lösungen mit einem im Zylinderkopf positionierten Cartridgeventil und somit ein größeres Potenzial zur Erreichung hoher Verstellgeschwindigkeiten. Mit elektrischen Systemen können sehr flexibel sehr hohe Verstellgeschwindigkeiten realisiert werden, allerdings mit höherem Aufwand.

Zum Fixieren der Steuerzeit wird bei hydraulischen VCP Systemen über das Steuerventil das Ölvolumen in den Kammern des Verstellers eingeschlossen. Die Genauigkeit der Steuerzeiteinstellung ist im Wesentlichen von der Kompressibilität des Öls und von Leckagestellen abhängig. Lösungen mit Zentralventil bieten einen leichten Vorteil, weil die leckagebehaftete Ölübergabe zwischen Nockenwelle und Zylinderkopf in den Steuerleitungen entfällt. Elektrische Systeme bieten eine höhere Steifigkeit bei Drehmomentbeaufschlagung zwischen Antriebsrad und Nockenwelle.

Hydraulische VCP Systeme sind üblicherweise mit einem Verriegelungsmechanismus ausgerüstet. Damit kann für den Motorstart entweder die frühe oder späte Steuerzeit genutzt werden. Eine andere Steuerzeit ist nach dem Aufbau des Motoröldruckes wählbar. Mit elektrischen VCP Systemen ist beim Motorstart jede beliebige Steuerzeit einstellbar. Diese Systeme bieten den höchsten Freiheitsgrad bei der Wahl der Startsteuerzeit.

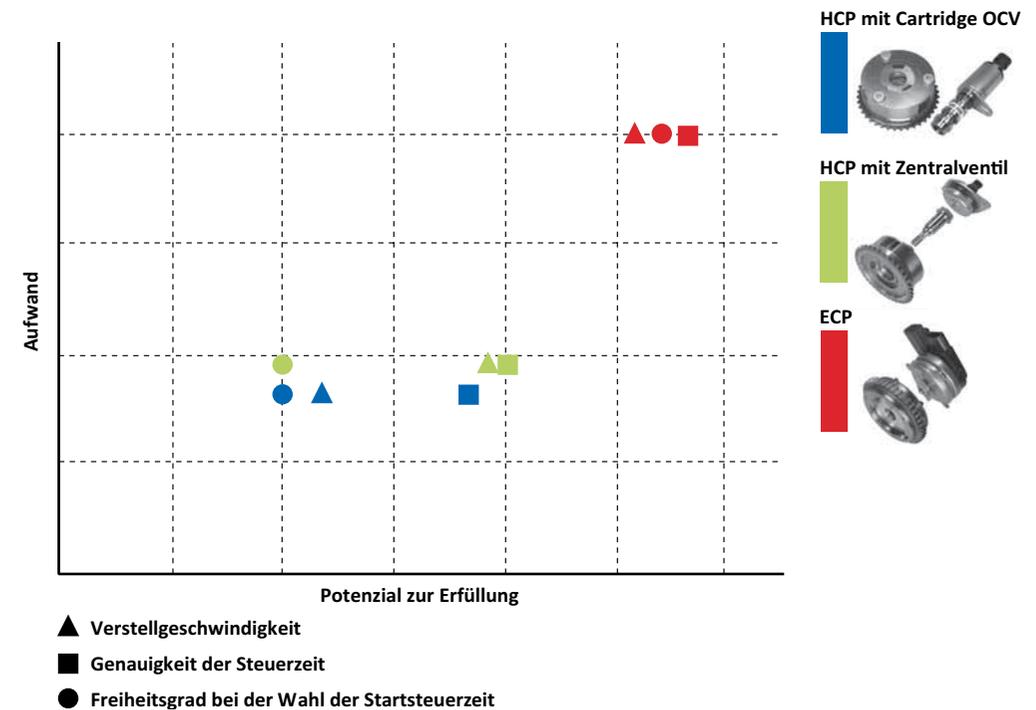


Bild 5 Systemvergleich

Der hydraulische Speicher als Lösungsansatz

Die vorhandene Lücke zwischen einem hydraulischen und einem elektrischen Nockenwellenverstellsystem hinsichtlich der Verstellgeschwindigkeit soll durch ein hydraulisches Speicher geschlossen werden.

Der Speicher, als Teil des konventionellen hydraulischen Systems mit Cartridgeventil oder Zentralventil, hat die Aufgabe während des Motorbetriebs Energie in Form von Öldruck zu speichern. Diese soll während eines Verstellvorgangs dem Verstellsystem wieder zur Verfügung gestellt werden. Zur Erfüllung dieser Aufgabe ist der Druckspeicher, dargestellt im Bild 6, vor dem hydraulischen Steuerventil angeordnet und mit der Ölversorgungsleitung verbunden. Zwischen den beiden Komponenten Speicher und Steuerventil befindet sich noch ein Rückschlagventil, welches ein Fließen des Motoröls aus dem Verstellsystem zurück in den Motor bzw. in den Speicher verhindert. Dadurch bleibt das Verstellsystem in allen Betriebspunkten regelbar.

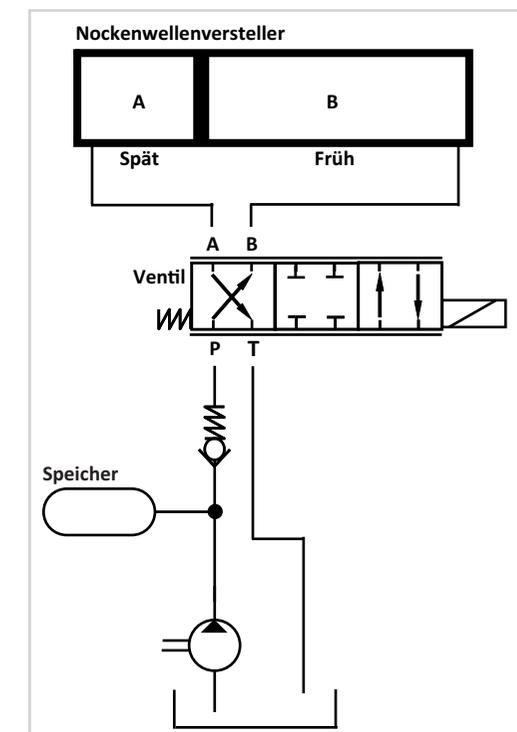


Bild 6 Der hydraulische Speicher als Lösungsansatz

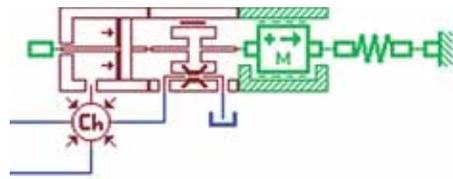


Bild 7 Simulation der Wirkung eines Speichers im Ölsystem

Zur Abschätzung des Verstellgeschwindigkeitspotenzials und zur Optimierung des Druckspeichers wurde ein Simulationsmodell aufgebaut. Der Druckspeicher als Teil dieses Modells ist im Bild 7 zu sehen. Vereinfacht lässt sich der Druckspeicher als Feder-Masse-System beschreiben, welches mit einem Öldruck beaufschlagt wird. Es befindet sich im Gleichgewicht, wenn die Druckkraft der Federkraft entspricht. Für die Ermittlung der optimalen Auslegungskriterien des Druckspeichers wurde eine Reihe von Eingabeparametern variiert. Zu diesen zählen primär die Kolbenmasse, die Vorspannkraft und die Federrate der Druckfeder. Die sekundären Einflussparameter wie Leckage und Reibung wurden in begleitenden Komponententests ermittelt und sind als konstante Größen in die Simulation eingeflossen.

Das Ergebnis der Simulation ist im Bild 8 dargestellt. Es zeigt die Verstellgeschwindigkeit des Nockenwellenverstellsystems in Abhängigkeit vom vorhandenen Öldruck im Zylinderkopf. Im oberen Teil des Diagramms verstellt das System von frühen zu späteren Steuerzeiten. Im Gegensatz dazu ist in der unteren Hälfte die Verstellung von späten zu früheren Steuerzeiten dargestellt.

Bild 8 zeigt das Verbesserungspotenzial durch den Speicher über einem weiten Öldruckbereich. In

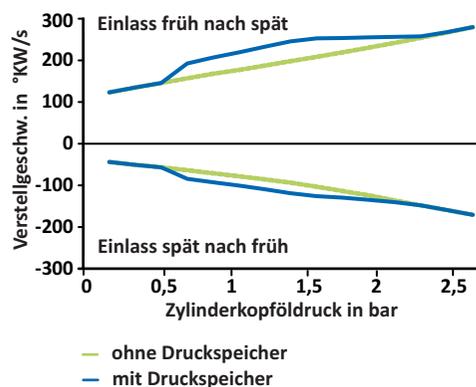


Bild 8 Verbesserung der Verstellgeschwindigkeit bei 90 °C

welchem Druckbereich und in welcher Höhe ein Potenzial vorhanden ist, ist abhängig von der Charakteristik der Druckfeder. In diesem Beispiel wurde die Druckfeder so abgestimmt, dass die Aufladung des Druckspeichers bei ca. 0,6 bar beginnt und der Kolben bei ca. 1,5 bar relativem Öldruck in der Endposition anschlägt. Die Überprüfung des Simulationsergebnisses erfolgte durch Messung der Verstellgeschwindigkeit des Nockenwellenverstellsystems an einem befeuerten 4-Zylinder-Benzinmotor mit 2,0 l Hubraum. Im Bild 9 ist beispielhaft eine Messung des Einlassnockenwellenverstellers dargestellt, die bei den Betriebsbedingungen 910 1/min Motordrehzahl, 90 °C Öltemperatur im Zylinderkopf und Nulllast aufgezeichnet wurde.

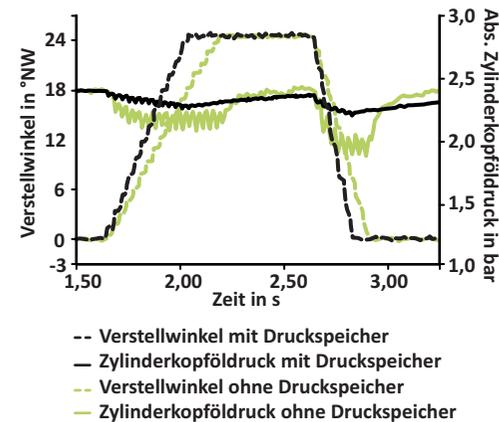


Bild 9 Versuchsergebnis passiver Speicher bei Leerlauf, 90 °C und Nulllast

Die Messung zeigt die Winkelposition des Nockenwellenverstellsystems ohne und mit Speicher und den dazugehörigen Öldruck im Zylinderkopf in Abhängigkeit von der Zeit. Die gesuchte Größe Verstellgeschwindigkeit lässt sich aus der Winkelposition und der Zeit ableiten. Der Vergleich beider Systeme zeigt, dass das System mit Druckspeicher (schwarze Kurve) früher den Endanschlag im Stator erreicht als das System ohne Druckspeicher (grüne Kurve). Dieser Verstellgeschwindigkeitsvorteil ist unabhängig davon, ob die Verstellung von der Basis, welche bei 0°NW liegt, weg oder zur Basis hin erfolgt. Allein das Reibmoment der Nockenwelle ist die Ursache, dass die Verstellung in beide Richtungen nicht symmetrisch erfolgt.

Die Antwort auf die Frage warum das Nockenwellenverstellsystem mit Speicher schneller verstellt,

lässt sich aus dem Vergleich der beiden Öldrücke begründen. Bei dem System mit Druckspeicher (schwarze Kurve) bricht der Öldruck während der Verstellung langsamer ein, als bei dem System ohne Druckspeicher (grüne Kurve). Das liegt daran, dass der Großteil des benötigten Öl-volumens vom Druckspeicher zur Verfügung gestellt wird und dem Verstellsystem somit mehr Energie für den Verstellvorgang zur Verfügung steht. Der dabei entstehende Öldruckabfall wird primär durch die Auslegung der Druckfeder bestimmt. Je größer das Öl-volumen ist, das bei einer Druckdifferenz aus dem Speicher geschoben werden kann, desto geringer ist der Öldruckeinbruch im Motor.

Systembeschreibung „passiver“ Druckspeicher in Nockenwelle

Der passive Druckspeicher, dargestellt in Bild 10 und Bild 11, besteht aus einem napfförmigen Kolben, einer Druckfeder, einem Führungselement und einem dünnwandigen Gehäuse mit einer stirnseitig montierten Verschlusskappe. Der Kolben ist innerhalb des Gehäuses geführt. Er wandelt beim Befüllen den von der Ölpumpe bereitgestellten Öldruck in potenzielle Energie um, welche in einer Druckfeder gespeichert wird. Die Bewegung des Kolbens wird durch zwei Anschläge begrenzt. In der entspannten Basisposition schlägt der Kolben an der Innenseite des Verschlussstopfens und in der Endlagenposition am Führungselement an.

Die Druckfederkräfte werden beschrieben durch die Vorspannkraft in der Basisposition und der Fe-

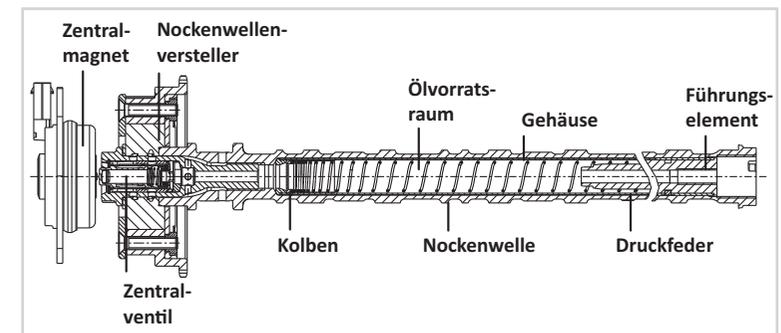


Bild 10 Konstruktive Ausführung passiver Druckspeicher (Schaltstellung 1)

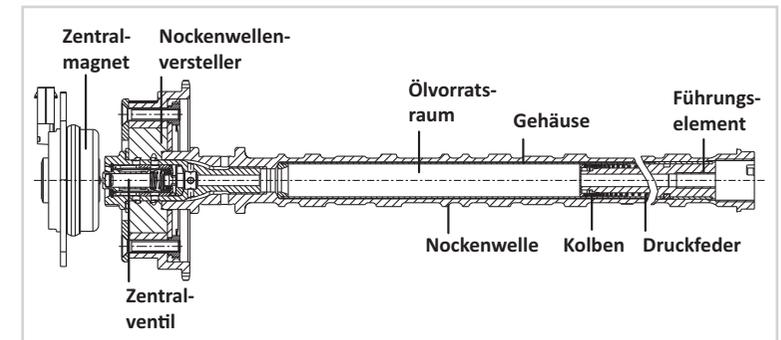


Bild 11 Konstruktive Ausführung passiver Druckspeicher (Schaltstellung 2)

derrate, welche den Kraftanstieg über dem Kolbenweg bis in die Endlagenposition definiert. Zur Führung der Druckfeder im hinteren Teil des Gehäuses dient das Führungselement. In ihm befindet sich eine zentrale Bohrung. Diese wird benötigt für die Be- und Entlüftung des Raums in dem die Druckfeder arbeitet. Gleichzeitig wird hierüber die Öl-leckage in den Tank abgeführt.

Am Verbrennungsmotor wird die Baugruppe von der dem Versteller abgewandten Seite bis auf Anschlag in die Nockenwelle geschoben und mit einer Verschlusschraube axial gesichert. Diese ist hohl ausgeführt, um die Verbindung zwischen der zentralen Bohrung im Führungselement und dem Motorraum nicht zu unterbrechen. Die Druckspeichereinheit ist an beiden Gehäuseenden über konisch ausgeführte Schnittstellen gelagert. Der durch die Zentrierung entstandene umlaufende Spalt verhindert eine Übertragung von Zylinderformabweichungen des Nockenwelleninnendurchmessers auf die Kolbenlauffläche. Damit wird ein sicherer Betrieb im Verbrennungsmotor gewährleistet.

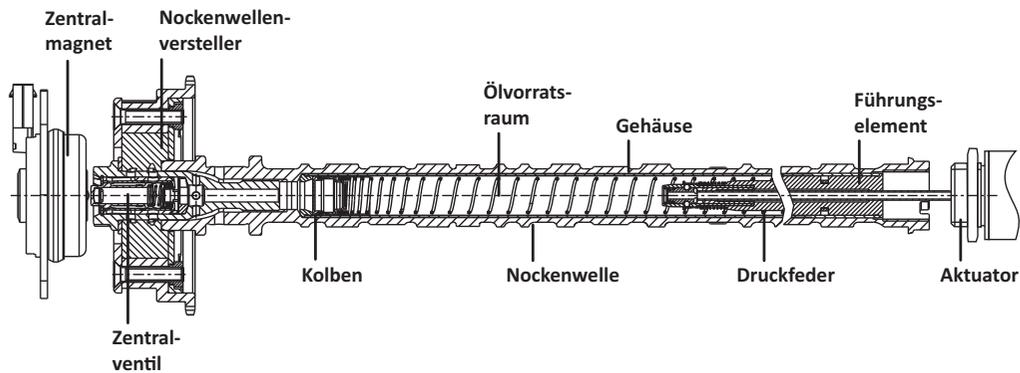


Bild 12 Konstruktive Ausführung „aktiver“ Druckspeicher (Schaltstellung 1)

Systembeschreibung „aktiver“ Druckspeicher

Der aktive Druckspeicher besteht aus einem Gehäuse, einer Druckfeder und einem zylindrischen Kolben, welche auch beim passiven System verwendet werden. Hinzu kommt ein nockenwellenfester, schaltbarer Koppelmechanismus, der den Kolben bei vollem Öl-vorratsraum lösbar verriegelt. Dieser sitzt, wie in Bild 12 dargestellt, am hinteren Ende des Speichers.

Bei abgestelltem Motor bleibt das Motoröl druckfrei im Vorratsraum zurück und wird nicht, wie beim passiven Druckspeicher, sofort über die Leckagestellen am Motor herausgedrückt. Da die Ölpumpe nach dem Motorstart eine gewisse Zeit braucht, um den für einen Verstellvorgang des Nockenwellenverstellers erforderlichen Motoröldruck aufzubauen, kann durch ein gezieltes Entladen des Druckspeichers sofort eine Verstellung aus der Basisposition heraus erfolgen. Der aktive Druckspeicher ist zum Beispiel geeignet für Motoren mit Stopp-Start Systemen. Maßgebend für die Auslegung der Arbeitsdrücke des aktiven Speichers ist der Entladevorgang beim Motorstart. Das erforderliche Arbeitsdruckniveau liegt über dem optimalen Druckniveau des passiven Druckspeichers, welches für eine Verstellgeschwindigkeitsverbesserung bei Heiß-leerlauf notwendig wäre (Bild 13).

Zur Funktionsbeschreibung wird der verriegelte Zustand, wie in

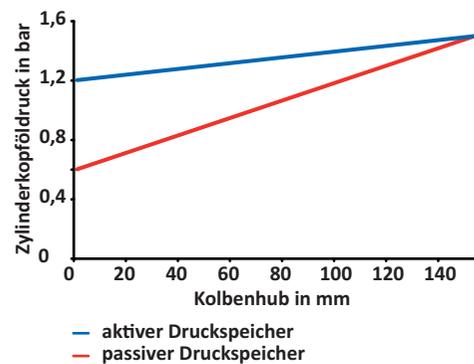


Bild 13 Gegenüberstellung der Arbeitsbereiche des aktiven und passiven Speichers

Bild 14 dargestellt, betrachtet. Zum Entriegeln des Kolbens drückt ein am Zylinderkopf befestigter, elektromagnetischer Aktuator über eine Stange gegen eine Rückstellfeder auf den Schaltpin mit einer umlaufenden Nut.

Sobald die Kugeln radial in die umlaufende Nut abtauchen können, werden diese mittels der Druckfederkraft radial nach innen gedrückt und dadurch der Kolben freigegeben. Die Druckfederkraft wirkt über den Kolben und ein im Kolben eingepresstes Blech auf die Kugeln. Um ein Herausfallen der Kugeln aus den Boh-

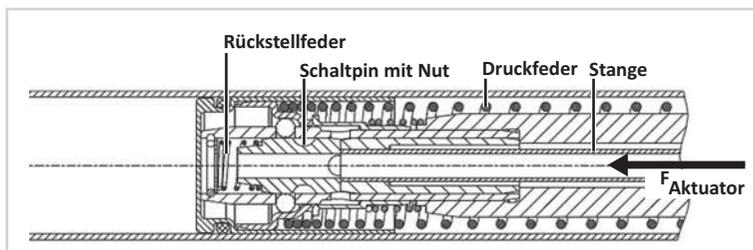


Bild 14 Detailansicht Koppelmechanismus im verriegelten Zustand

rungen nach außen zu verhindern, schiebt eine weitere Druckfeder, die Stülplechfeder, das Stülplech nach dem Abkoppeln über die Bohrungen, wie in Bild 15 dargestellt.

Wird der Speicher befüllt, rastet der Kolben automatisch im Koppelmechanismus ein. Dabei schiebt das Verriegelungsblech des Kolbens das Stülplech gegen die Stülplechfeder zurück bis der Kolbenboden am Koppelmechanismus anschlägt. In dieser Position wird über die Rückstellfeder der Schaltpin axial verschoben und die Kugeln aus der Nut radial nach außen gedrückt, d. h. der Kolben wird festgehalten. Dabei werden auch die Stange und der Aktuator in die Ausgangsstellung zurück geschoben. Der Kolben lässt sich durch kurzes Bestromen des Aktuators erneut entriegeln.

Versuchsergebnisse aktiver Speicher

Die Messungen am befeuerten Versuchsmotor zeigen beim Motorstart durch das Entleeren des Druckspeichers einen sofortigen Druckanstieg des Motoröls in der Nockenwelle. Dies hat zur Folge, dass die Verstellung aus der Basisposition heraus früher beginnen kann, als ohne Druckspeicher. Bei kurzen Motorstandzeiten, z. B. beim Warten an einer Ampel, funktioniert der Druckaufbau in der Nockenwelle mit dem Speicher. Bei langen Standzeiten, z. B. wenn das Fahrzeug über Nacht abgestellt wird, entleert sich der Öl-vorratsraum über die Leckagestellen des Drehübertragers und des Nockenwellen-

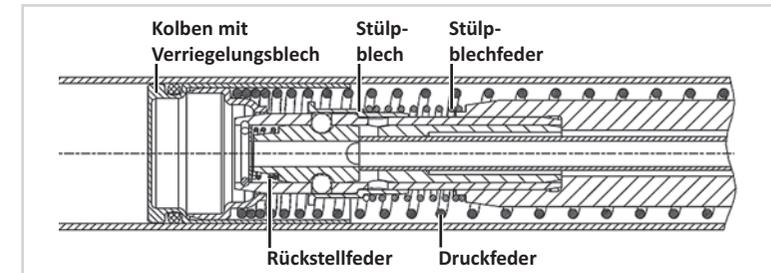


Bild 15 Detailansicht Koppelmechanismus im entriegelten Zustand

stellers zu einem Großteil. Das bedeutet, dass in diesem Fall keine Unterstützung beim Motorstart gegeben werden kann. In Bild 16 ist beispielhaft ein Startvorgang bei einer Motoröltemperatur von 40 °C nach 10 Minuten Standzeit mit und ohne Druckspeicherunterstützung dargestellt. Vergleicht man die Drücke in der Nockenwelle (rote Kurven) ist der sprunghafte Druckanstieg in der Konfiguration mit Speicher erkennbar. In schwarzer Farbe dargestellt ist der Verstellwinkel. Der Verstellvorgang aus der Basisposition beginnt mit Speicher früher. Bei der Konfiguration ohne Speicher und bestromtem Steuerventil, schwingt der Verstellwinkel ab dem Beginn des Verstellvorgangs, aufgrund einer schlechteren hydraulischen Einspannung.

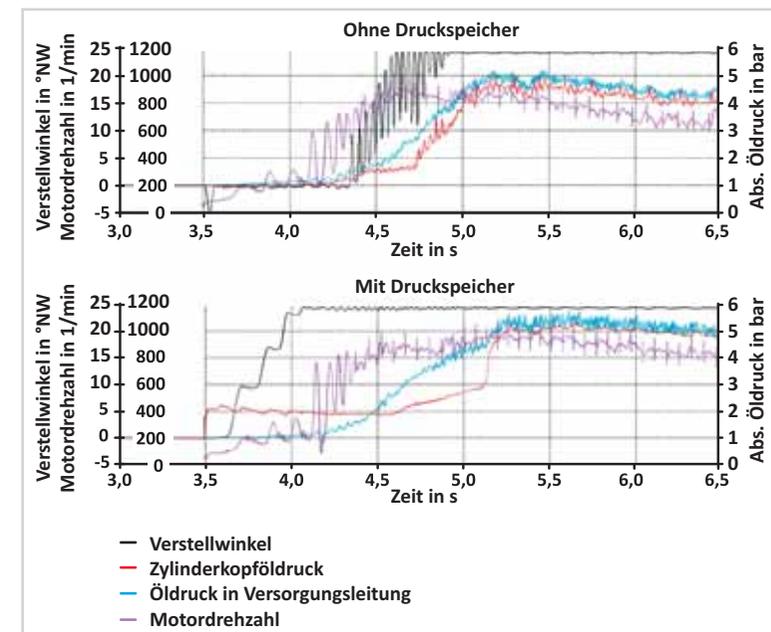


Bild 16 Versuchsergebnisse aktiver Speicher bei Motorstart

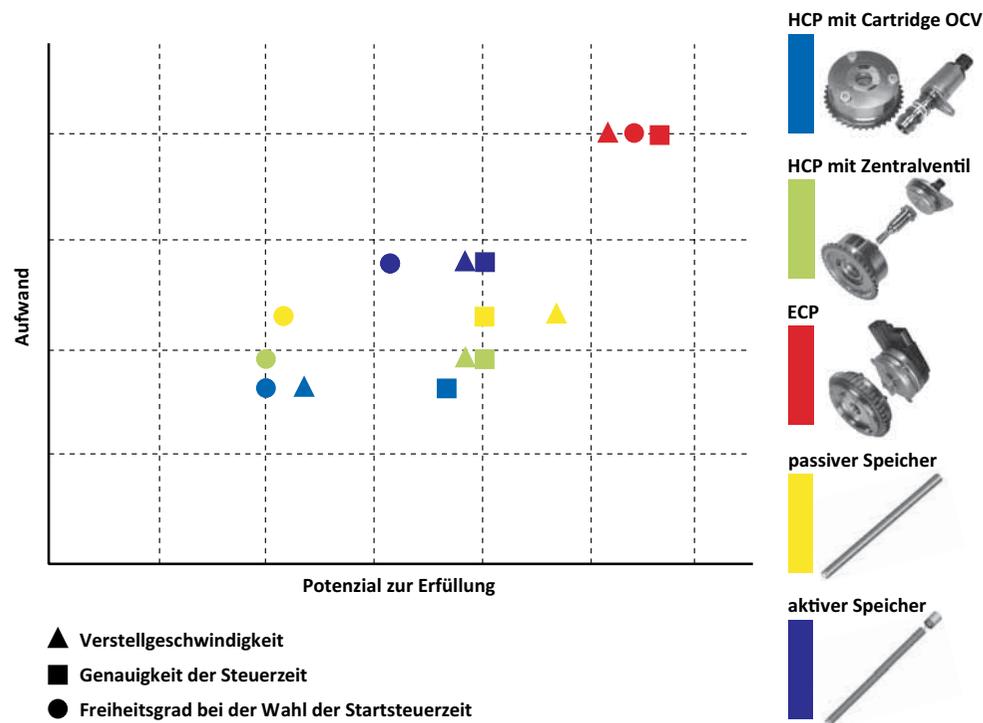


Bild 17 Positionierung der Speicher im Systemvergleich

Positionierung der Speicher im Systemvergleich

Wird das hydraulische VCP System um einen passiven Speicher erweitert, kann die Lücke zu elektrischen Systemen bezüglich der erreichbaren Verstellgeschwindigkeit zu einem großen Teil geschlossen werden (Bild 17). Der zusätzliche Aufwand ist moderat. Die Genauigkeit der Steuerzeit bleibt unbeeinflusst. Da der Öldruckabbau beim Abstellen des Motors, wegen des Entspannens des Speichers etwas verzögert erfolgt, wird das Erreichen der „Wunschsteuerzeit“ beim Motorabstellen unterstützt. Somit wird das Potenzial für die Wahl der Startsteuerzeit gegenüber herkömmlichen VCP Systemen etwas verbessert.

Mit dem aktiven Speicher kann die Wahl der Startsteuerzeit weiter verbessert werden. Allerdings ist dafür ein höherer Aufwand erforderlich. Die Verstellgeschwindigkeit und die Genauigkeit der Steuerzeiteinstellung hydraulischer Systeme werden ebenfalls nicht beeinflusst.

Zusammenfassung

Der Wechsel von hydraulischen hin zu elektrischen VCP Systemen wird von den Funktionsanforderungen des Verbrennungsmotors bestimmt. Elektrische VCP Systeme werden die hydraulischen VCP Systeme verdrängen, sobald der Gesamtaufwand zur Bereitstellung der benötigten Funktionen mit hydraulischen Lösungen den Gesamtaufwand von elektrischen Lösungen übersteigt. Die zukünftige Brennverfahrensentwicklung wird maßgeblichen Einfluss auf den Zeitpunkt dieses Wechsels nehmen.

Literatur

- [1] Schäfer, J; Balko, J.: High Performance Electric Phasing System, SAE paper 2007-01-1294
- [2] Strauß, A.; Busse, M.; Schäfer, J.: Späte Einlass Schließ Konzepte (LIVC) – Eine Herausforderung für innovative Stopp-Start Funktionen, Kongress Variable Ventilsteuerung, Haus der Technik 2009