

Variabler Ventiltrieb

Vom Konzept zur Serienfreigabe

____ Neue Fahrzeuge unterliegen immer niedrigeren Grenzwerten in Verbrauchzyklen und Emissionen. Gleichzeitig steigen die Anforderungen in Bezug auf Motorleistung, Drehmoment und Laufruhe bei niedrigen Motordrehzahlen. Eine Schlüsselrolle bei der Lösung dieser Zielkonflikte spielt der Ladungswechsel. Insbesondere die Entwicklung eines optimierten, variablen Ventiltriebs zeigt Potenzial.

Von Andreas Eichenberg

Der Ladungswechsel und somit die Auslegung der Ventilerhebungskurven eines Viertaktmotors sind maßgeblich für die Erfüllung der gegenwärtigen Anforderungen. Die Öffnung der Gaswechselventile wird konventionell auf maximale Motorleistung ausgelegt. Diese Definition stellt jedoch einen Kompromiss zu allen anderen Betriebspunkten im Motorkennfeld dar. Um eine verbesserte Auslegung im gesamten Kennfeld zu erhalten, werden zwei oder mehrere Ventilhubkurven benötigt, welche auf die jeweiligen Entwicklungsschwerpunkte im Betriebskennfeld abgestimmt sind. Porsche Engineering hat sich deshalb – unter anderem – auf die Entwicklung und Erprobung von Schlnockensystemen spezialisiert, welche die Vorteile verschiedener variabler Ventiltriebsysteme kombinieren.

Ventiltriebsysteme heutiger Verbrennungsmotoren beruhen im Wesentlichen auf der Übertragung der vom Nockenprofil vorgegebenen Bewegung, also auf das sich öffnende und schließende Gaswechselventil. Die Bewegung wird dabei von unterschiedlichen Übertragungselementen abgebildet. Bei diesen kommen unterschiedliche Prinzipien infrage. In heutigen Verbrennungsmotoren sind die am häufigsten vertretenen Elemente Schlepphebel mit Gleit- oder Rollenabgriff. Die Ventilderfeder verbindet in diesem Gesamtsystem während der Ventilerhebung kraftschlüssig das Gaswechselventil mit dem Schlepphebel. In zusammengesetzter Form heißen diese Komponenten Ventiltrieb.

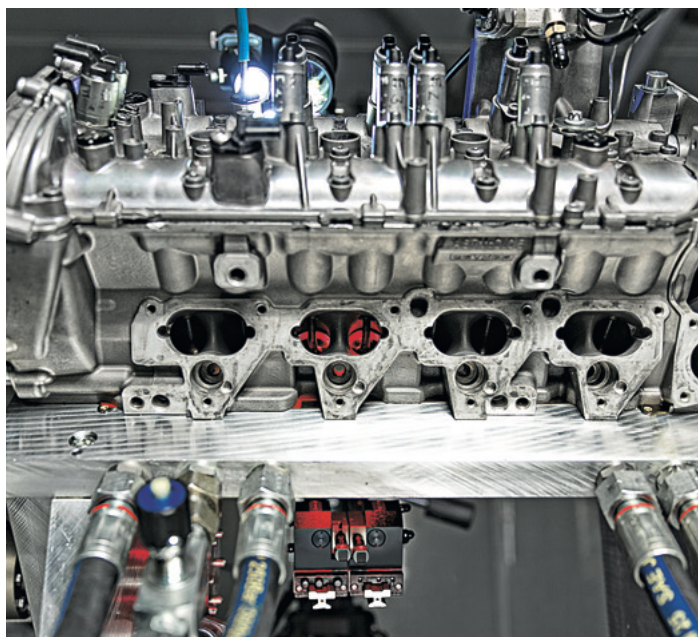
Die Ventiltriebsentwicklung reicht von Konzeption, konstruktiver Detaillierung, Auslegung und Simulation über die Erprobung im geschleppten Zylinderkopf bis hin zur Vollmotor-

untersuchung. Durch eine frühzeitige Absicherung der Funktion in der Simulation und am Attrappenprüfstand können die Entwicklungszeiten des Gesamtmotors kurz gehalten werden. Dabei kommt zunehmend eine simulationsgestützte Erprobung zum Einsatz. Diese wird mit steigender Komplexität der variablen, schaltbaren Ventiltriebsysteme immer wichtiger.

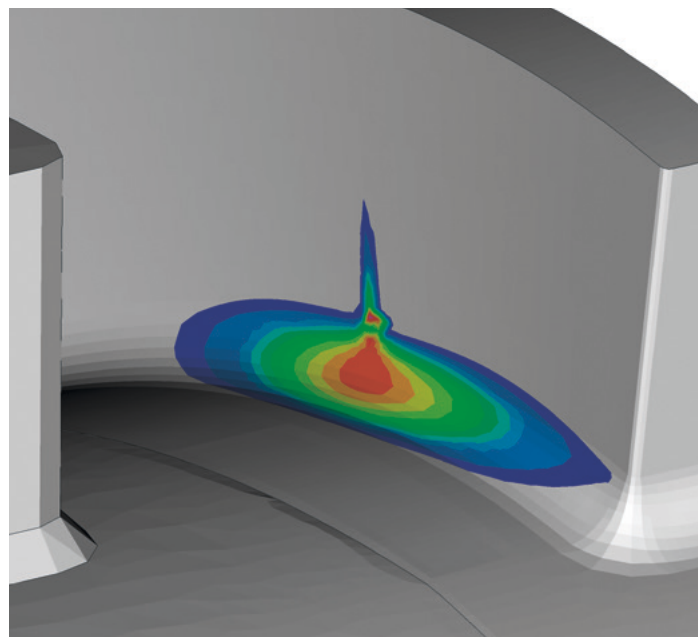
Verschiedene Automobilhersteller setzen variable Ventiltriebe ein. Dabei sind Schlnockensysteme am häufigsten vertreten. Zusätzlich werden beispielsweise vollvariable, mechanische Systeme oder hydraulisch betätigte, mechanisch schaltbare Systeme verwendet. Die Ausprägungsvielfalt von Schlnockensystemen erhöht die Komplexität der Entwicklung im gleichen Maße wie die Anforderungen hinsichtlich bewegter Massen und Schaltdrehzahlen.

Effektiv und wirtschaftlich: Schlnockensysteme

Der Aufbau eines Schlnockensystems ist bei aller Vielzahl der am Markt befindlichen Systeme prinzipiell immer gleich. Ein Nockenschiebestück mit mehreren Ventilhubkonturen wird in einer vordefinierten Nut – der Schlnockkulis – durch einen zylinderkopffesten Stößel entlang der Nockenwellenachse verschoben. Dabei resultiert die axiale Verschiebewegung aus der Rotation der Nockenwelle. Der Stößel ist Bestandteil eines elektromagnetischen Aktuators, welcher vom Motorsteuergerät kennfeldbasiert angesteuert wird. Das Nockenschiebestück wird in axialer Richtung über eine innenliegende Grundwelle geführt.



Ventiltriebsdynamik am geschleppten Zylinderkopf



Ergebnis der Strukturberechnung Kulissenparameter–Lebensdauer

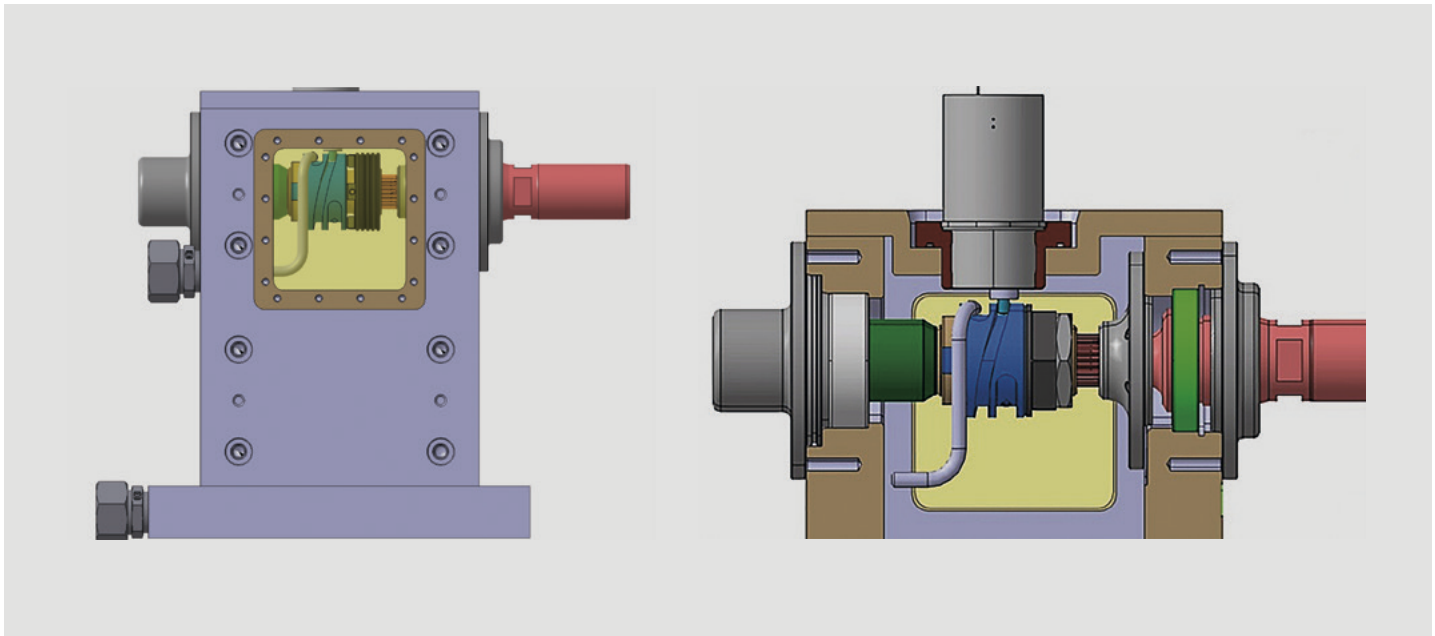
Die Vorteile dieses variablen Ventiltriebsystems liegen einerseits im geringen Einfluss auf das dynamische Öffnungs- und Schließverhalten der Gaswechselventile und andererseits in der geringeren aufbau- und fertigungstechnischen Komplexität des Systems. Die Dynamik des Ventiltriebs ist abhängig von seiner bewegten Masse. Bei Schlnockensystemen wird die bewegte Masse systembedingt nicht erhöht. Im Vergleich zu anderen mechanisch variablen Ventiltriebsystemen umfasst ein Schlnockensystem weniger Komponenten und deren Fertigung ist zudem einfacher, was sich direkt in der Komplexität der Entwicklung niederschlägt.

Schlnockensysteme stellen wegen ihres Aufbaus spezifische Herausforderungen an die Entwicklung. Insbesondere sind die Schaltdrehzahl, das Gewicht des Nockenschiebestücks und die in der Schaltkulissee abzubildenden Systemtoleranzen zu berücksichtigen. Porsche Engineering hat für die Entwicklung solcher Systeme – basierend auf den Erfahrungen mit konventionellen Ventiltriebskonzepten – einen modularen Prozess aufgebaut. Der Vorteil: hohe Flexibilität und Schnelligkeit.

Grundlage bildet dabei die Beschreibung der Anforderungen eines variablen Ventiltriebs. In der Konzeptionsphase werden diese Anforderungen und Rahmenbedingungen in eine prinzipielle Konstruktion umgesetzt. Für ein Schlnockensystem sind die wesentlichen Fragestellungen die Lagerung von Grundwelle und Nockenschiebestück, die Arretierung des Letzteren, die Anzahl der verschiedenen Nockenprofile (die zu zwei- oder mehrstufigen Schaltmechanismen führen) und die Ausführung der elektromagnetischen Aktuatorik. Diese Punkte beeinflussen neben der konstruktiven Detaillierung das Gesamtgewicht des Nockenschiebestücks. Als Herzstück eines solchen Schlnockensystems wird die Schaltkulissee vom Gewicht des Nockenschiebestücks und der zu erreichenden maximalen Schaltdrehzahl definiert. Die kinematische Länge der Schaltkulissee ist dabei von der Position der Ventilerhebungskurven beeinflusst. So wird in der Auslegungsphase auf Grundlage der kraftfreien Grundkreisphasen des Ventiltriebs der Verschiebeweg bestimmt und anhand der Beschleunigung in seinem Verlauf festgelegt.

Eigenentwicklung: Mehrkörpersimulationsmodell

Basierend auf der Erfahrung von Porsche Engineering entstand ein dynamisches Mehrkörpersimulationsmodell (MKS-Modell). Dieses bildet die dynamischen Einflüsse auf den Verschiebeweg ab. Einflussgrößen sind unter anderem das Spiel zwischen Aktuatorstößel und Schaltkulissee sowie die Steifigkeiten ihres Verbundes, die wirkenden Dämpfungen und die



Aufbau eines Tribologie-Prüfstands bei Porsche Engineering

Schaltdrehzahlen. Die Ergebnisse aus dem MKS-Modell bilden die Grundlage für eine iterative Modifikation des Beschleunigungsverlaufs der Schaltkulisse. Die Minimierung der Belastungen am Aktuatorstößel und der Schaltkulisse in Form der wirkenden Hertzschen Pressung und Abstützkraft im Aktuator steht dabei im Vordergrund. Besonders ist auf den Flankenwechsel innerhalb der Schaltkulisse beim Übergang von der Beschleunigung zur Verzögerung des Nockenschiebestückes zu achten. Das Ergebnis dieses iterativen Auslegungsprozesses ist eine dynamisch abgesicherte Schaltkulisse, welche rechnerisch optimal zu den gesetzten Rahmenbedingungen passt.

Für die simulierten Belastungen werden in der konstruktiven CAD-Detaillierung die Schaltkulissenparameter angepasst. Besonderes Augenmerk gilt dabei Bereichen mit geringer Wandstärke und einer optimalen Tragbildverteilung des Aktuatorstößels auf der Kulissenflanke. Die Schaltkulissenparameter werden unter anderem in Strukturberechnungen mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) bestätigt. Die Strukturberechnungen dienen zudem der Bewertung der Kontaktbedingungen und der wirkenden Materialspannungen. Die Bereiche mit geringer Wandstärke werden infolge der wechselnden Belastungen mithilfe von Lebensdauerberech-

nungen beurteilt. Die Detailkonstruktion schließt diese theoretisch geprägte Entwicklungsphase in der Regel mit einem entsprechenden Rapid-Prototyping-Bauteil als Anschauungsmuster ab.

Vorerprobung sichert Werkstoffe und Beschichtungen ab

In der Vorerprobung werden die Einzelkomponenten untersucht. Dies geschieht in einer möglichst frühen Entwicklungsphase, um die erarbeiteten Untersuchungsergebnisse ohne Entwicklungsschleifen in die Produktentstehung einfließen zu lassen. Dabei liegt der Fokus auf der Erprobung verschiedener Werkstoffpaarungen und Beschichtungssysteme im Bereich des Materialkontakts zwischen Aktuatorstößel und Kulissenflanke. Ergänzt wird die Vorerprobung durch die Untersuchung der Aktuator-Schaltzeit unter verschiedenen Einflussparametern. So wird beispielsweise die elektromagnetisch vorhandene Tot- und Flugzeit der Aktuatorik für den Vollmotorbetrieb im Bereich von -20°C bis 120°C bezüglich der Öl- und Bauteiltemperaturen untersucht. Entscheidend sind dabei die Reproduzierbarkeit der Beölungsverhältnisse und die Untersuchungsrandbedingungen.

Tribologische Untersuchungen werden bei Porsche Engineering an einem eigens für diese Erprobung konzipierten Prüfstand durchgeführt. Dabei geht es um die Untersuchung der Wechselwirkung verschiedener Oberflächen in einer Relativbewegung hinsichtlich der Materialkennwerte und Beschichtungssysteme. Ziel ist es dabei, in möglichst kurzer Zeit eine Aussage über die gewählte tribologische Paarung zu treffen.

Das Herzstück des Tribologie-Prüfstands ist das Wechselschiebestück, auf welchem sich die in der Auslegungsphase definierte Schaltkulisse befindet. Das Wechselschiebestück wird von einer keilverzahnten Grundwelle angetrieben. In der Schaltkulissee befindet sich dauerhaft ein Aktuatorstößel, der in einem elektromagnetischen Aktuator gelagert ist. Für ideale Schmierölbedingungen innerhalb des Prüfstandes sorgt eine Ölspritzdüse. Ein Gehäuse schirmt die Prüfschleife vom während des Betriebs entstehenden Schmierölnebel ab.

Dieser modulare Aufbau des Prüfstands ermöglicht einen hochflexiblen Einsatz und schnelle Modifikationen der zu untersuchenden Bauteile. Bei der Vorerprobung von Schaltnockensystemen werden beispielsweise unterschiedliche DLC-Beschichtungen (diamond-like-carbon), Änderungen von Werkstoffpaarungen im Bereich der Schaltkulissee und des Aktuatorstößels sowie verschiedene Beschleunigungsverläufe der Schaltkulissee untersucht.

Auf dem Wechselschiebestück ist die Schaltkulissee als Endlosnut gefertigt. Die Endloskulissee führt in Verbindung mit dem Aktuatorstößel zwei entgegengesetzte Verschiebungen des Wechselschiebestücks pro Umdrehung aus. Dadurch kann innerhalb kürzester Laufzeit des Prüfstandes bei gegebener Schaltdrehzahl eine große Anzahl von Schaltzyklen erfolgen. Drehzahl und Masse des Wechselschiebestücks bestimmen die Belastungen am Aktuatorstößel. Dabei stellt die Drehzahl einen Kompromiss zur Ansteuerungsfrequenz und somit zum lokalen Wärmeeintrag an den Prüfbauteilen dar. Die Analyse der Laufspuren an Schaltkulissee und Aktuatorstößel schließt die Vorerprobung ab. Die Ergebnisse fließen direkt in den Entwicklungsprozess – beispielsweise in die Bauteilfertigung – ein.

Abgesicherter Weg in die Serienfertigung

Die Fertigung der Komponenten des Schaltnockensystems verlangt wegen der Komplexität und der Anforderungen an Maßhaltigkeit und Oberfläche der Bauteile hohe Präzision. Porsche Engineering begleitet die Bearbeitung eines solchen Systems in der Prototypenphase, von der Wärmebehandlung über die

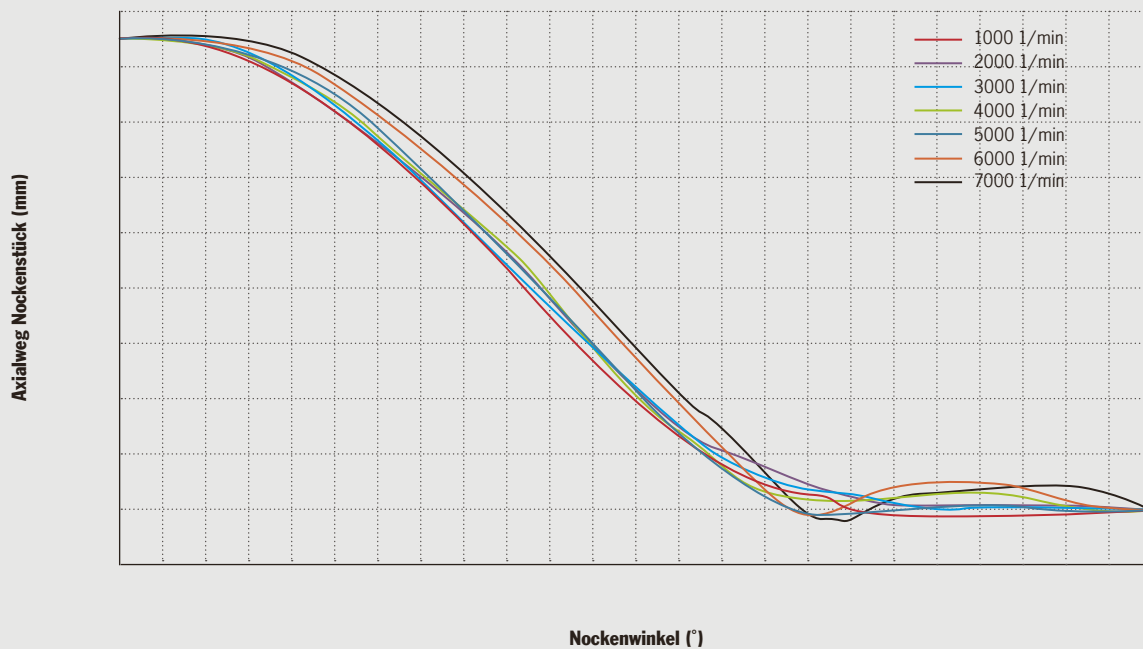
einzelnen Bearbeitungsschritte bis hin zur Bauteilvermessung und Qualitätskontrolle.

Funktionsuntersuchung und Dauerhaltbarkeitsprüfung schließen die Validierung des Schaltnockensystems ab. Diese Erprobungen erfolgen unter vollmotornahen Randbedingungen auf einem Zylinderkopfattappen-Prüfstand. Bei Letzterem handelt es sich um einen mit Messtechnik ausgerüsteten Zylinderkopf mit originalem Steuertrieb. Für den Antrieb sorgt eine drehmomentstarke Asynchronmaschine. Die Verbindung zwischen E-Maschine und Ersatzkurbelwelle übernimmt eine drehsteife Kupplung mit integriertem Drehmomentmessflansch, der die Antriebsmomente und somit die Reibung der einzelnen Aufbauten aufzeichnet.

Im Fokus der Erprobung des Schaltnockensystems stehen die Funktionsgrößen des Verschiebeweges und der dynamisch wirkenden Aktuatorstößelkräfte. Die Verschiebecharakteristik wird messtechnisch mittels eines magnetoresistiven Sensors und optisch mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera analysiert. Zur Messung der Aktuatorstößelkräfte während der Nockenverschiebung dienen kalibrierte Dehnungsmessstreifen im



Wechselschiebestück mit Endloskulissee



Hochaufgelöste Vermessung des dynamischen Verschiebeweges

Bereich der Stößelabstützung. Das System erfasst die messtechnischen Kennwerte über Nockenwellenwinkel bis hin zur maximalen Verschiebedrehzahl. Die dynamischen Effekte in den Messgrößen werden als Grundlage für die Weiterentwicklung und Freigabe des Schalnocken-systems ausgewertet. Dabei geht es um den Erstkontakt des Aktuatorstößels zur Schaltkulis-se, den Wechsel der Kulisse-seite von der Beschleunigungs- zur Verzögerungsflanke des Nockenschiebestücks und die End-anlage nach dessen vollständiger Verschiebung.

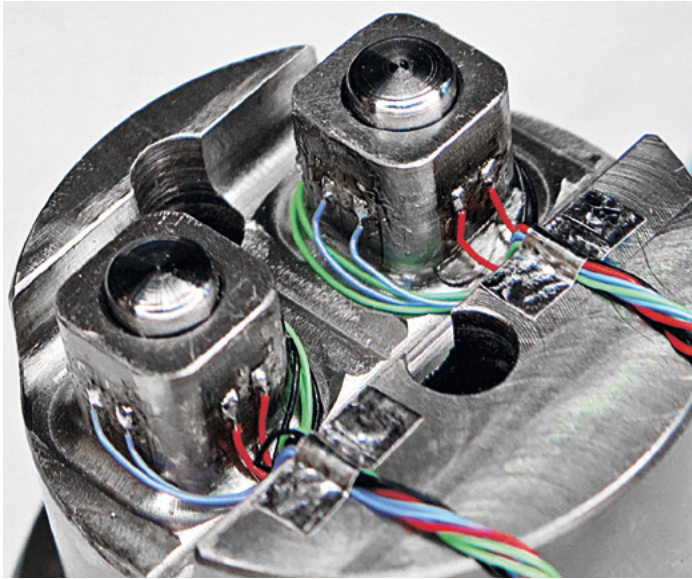
Ergänzende Untersuchungen zu den Drehschwingungen und der Verlagerungsbahn des Nockenschiebestücks sind abhängig vom gewählten Lager- und Ventiltriebskonzept. Diese Messungen fallen im Wesentlichen dann an, wenn sich negative Ein-flüsse auf das dynamische Öffnungs- und Schließverhalten der Gaswechselventile im Vollmotorbetrieb ergeben. Weiterhin gilt es, eine Beeinflussung der konventionellen Ventilbewegung durch das Schalnocken-system zu vermeiden. Zur Absicherung wird die Ventiltriebsdynamik am Zylinderkopfattrappen-Prüf-

stand oder im befeuerten Vollmotor gemessen. Die Untersu-chung der Schlepphebel- und Abstützelementbelastungen und die messtechnische Evaluierung der Reibleistungsanteile des variablen Ventiltriebs-systems komplettieren schließlich die Funktionsuntersuchung.

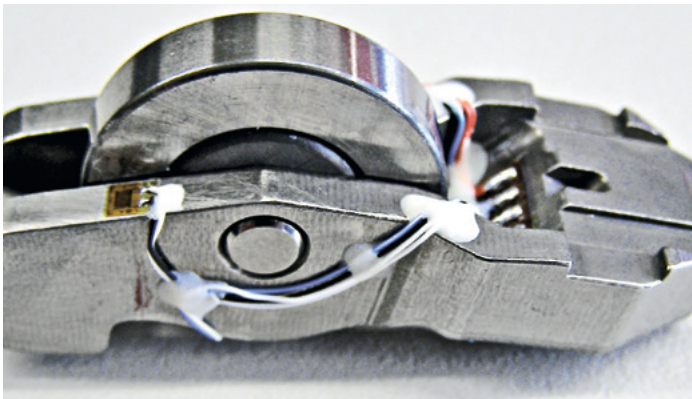
Schalnocken-system muss Dauerhaltbarkeit nachweisen

Nach der funktionalen Validierung kommt das Schalnocken-system zum Dauerlauf auf den Attrappenprüfstand. Die Absi-cherung dieses Teilsystems erfolgt ebenfalls im Zylinderkopf, um eine effiziente und schnelle Rückmeldung für die Gesamt-motorentwicklung zu generieren. Dazu werden einerseits mög-lichst reale – beispielsweise hochdynamische – und andererseits synthetische Drehzahlprofile automatisiert durchlaufen.

Der Fokus synthetischer Drehzahlprofile liegt in der Erprobung einer großen Schaltzyklenanzahl in kurzer Prüfstandslaufzeit,



DMS-Applikation Aktuatorstößelkraftmessung



DMS-Applikation Belastung Rollenschlepphebel

ohne dabei die realen Nutzungsbedingungen zu vernachlässigen. Die Bestromung der Aktuatorik wird von einem eigens hierfür entwickelten Echtzeitbetriebssystem ausgelöst, wenn die entsprechenden Schaltbedingungen vorliegen. Besonderes Augenmerk gilt der Vermeidung von Fehlschaltungen. Die dafür entwickelte intelligente Schaltlogik beruht auf der Erfassung der axialen und drehwinkelspezifischen Position des Nockenschiebestücks. Diese Messgrößen werden sensorisch redundant am Prüfstand erfasst. Die Vorsteuerung der bauteilspezifischen Tot- und Flugzeiten der Aktuatoren ist ebenfalls in der Schaltlogik abgebildet. So wird sichergestellt, dass die Aktuatorstößel nur im geometrisch vorgesehenen Winkelbereich ausgefahren werden.

Während der Dauererprobung werden die Laufflächen an Schaltkulisse und Aktuatorstößel regelmäßig begutachtet. Die Historie der Laufspuren sind Teil der ausführlichen Befundung nach absolviertem Schaltungsdauerlauf. Diese Daten über die Laufzeit stellen die Grundlage für die Gesamtvalidierung des Schalnockensystems dar. In einem solchen Dauerlauf werden entsprechend der Zielrandbedingungen unterschiedliche Grenzzustände untersucht. Diese beziehen sich einerseits auf die bauteilspezifischen Maße und andererseits auf die Funktionsrandbedingungen des Zielsystems. Die Dauererprobung ist die Grundlage für die funktionelle Weiterentwicklung oder die Freigabe des Schalnockensystems.

Fazit

Die frühzeitige Validierung von Teilsystemen des Verbrennungsmotors wird für die Verkürzung der Gesamtentwicklungsdauer immer wichtiger. Dieser Anforderung trägt der Entwicklungsprozess für Schalnockensysteme Rechnung. Es ist absehbar, dass mit der stetigen Weiterentwicklung der variablen Ventiltriebe weitere Einzelaufgaben hinzukommen werden. Dazu zählen beispielsweise die Absicherung von Fehlschaltungszuständen und die Entwicklung von Arretierungskonzepten. Porsche Engineering wird den Trend zur Mehrstufigkeit in diesen Systemen sowohl konzeptionell als auch konstruktiv begleiten und weiter vorantreiben. ■