Stepcom – zweistufig variable Verdichtung, Systemintegration und Industrialisierung

© Hilite

AUTOREN

Dipl.-Ing. (FH) Manfred Pöpperl
ist Director Engineering Projects bei der Hilite Germany GmbH in Marktheidenfeld.

Dipl.-Ing. Dietmar Schulze
ist Senior Manager Engineering bei der Hilite Germany GmbH in Marktheidenfeld.

Dr.-Ing. Daniel Henaux
ist Department Manager in der Business Unit Gasoline Powertrains der FEV Europe GmbH in Aachen.

Dr.-Ing. Tolga Uhlmann
ist Director Powertrain Engineering in der Business Unit Gasoline Powertrains der FEV Europe GmbH in Aachen.

Die Integration einer neuen Technologie in bestehende Grundmotorkonstruktionen ist eine große Herausforderung. Dies gewinnt an Bedeutung, da die Elektrifizierung des Antriebsstrangs zunehmend in den Vordergrund von Entwicklungsaktivitäten tritt und häufig nur begrenzte Änderungen am Grundmotor vorgenommen werden. Das von Hilite und FEV entwickelte Stepcom-System bietet eine Lösung zur Integration variabler Verdichtung, die sich nur minimal auf die bestehende Grundmotorkonstruktion auswirkt. Dieser Artikel beschreibt die Integration des Systems, dessen Kompatibilität mit elektrifizierten Antriebssträngen, die Systemvalidierung, ein verbessertes, kostenoptimierten Design und die Serienreife des Systems.

SYSTEMINTEGRATION

Die Integrierbarkeit in vorhandene Motorkonstruktionen ist der Schlüssel zu einer zeit- und kosteneffizienten Umsetzung zukünftiger Antriebstechnologien. Das Stepcom-System, **BILD 1**, erfüllt diese Anforderungen äußerst gut. Seine Implementierung wurde bereits an vielen verschiedenen Motorkonstruktionen demonstriert. Das System zur Realisierung einer variablen Verdichtung (Variable Compression Ratio, VCR) umfasst als neue Motorkomponenten ein VCR-Pleuel und eine Betätigungseinheit mit Positionssensorik.

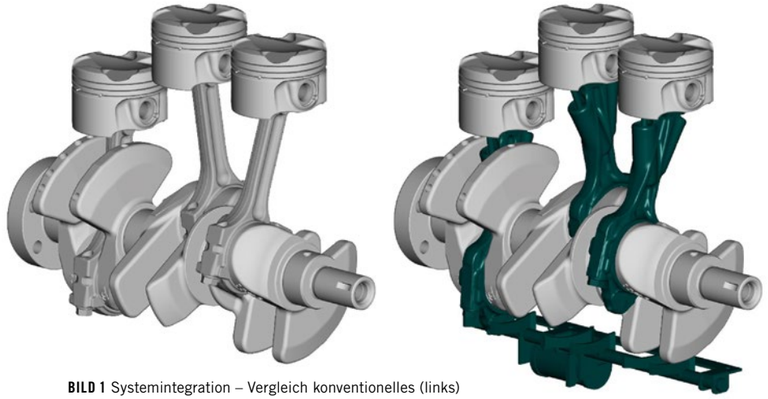

BILD 1 Systemintegration – Vergleich konventionelles (links) und Stepcom VCR Konstruktion (rechts) (© Hilite)

Da das VCR-Pleuel in den Designraum eines herkömmlichen Pleuels passt, besteht keine Notwendigkeit, die Pleuellagerung oder die Hauptabmessungen der Kurbelwelle zu verändern. Eine kleine Modifikation an der Kolbenunterseite kann erforderlich sein, um Platz für die etwas breitere Exzentereinheit zu schaffen. Besonderes Augenmerk ist auf eine kontinuierliche und anregungsarme Ölzufuhr von der Kurbelwelle zum Pleuel zu richten, die mittels Simulationen bewertet wird. Durch eine leicht erhöhte Pleuelmasse ist lediglich eine geringe Anpassung der Ausgleichsmassen nötig.

Der Betätigungsmechanismus ist im unteren Kurbelgehäuse angeordnet. Je nach Konstruktion des Grundmotors – also Reihen- oder V-Motor sowie Lage der Ausgleichswelle etc. – kann die Betätigung direkt unterhalb oder alternativ seitlich der Kurbelwelle positioniert werden.

Für den Mechanismus werden pro Zylinder zwei Leitbleche mit einer Metallstange verbunden, **BILD 2**. Zum Schalten wird die Betätigungseinheit parallel zur Kurbelachse verschoben, und das hydraulische Schaltventil unten am Pleuel wird in die gewünschte Position umgeschaltet. Ein doppelt wirkender Hubmagnet als Aktuator sorgt für die benötigte Kraft und ermöglicht zudem sicheren Betrieb, da die verschiebbare Einheit über eine Verriegelungsfunktion verfügt. Der Aktuator beinhaltet zudem eine indirekte Positionssensorik, die sich bei Bedarf zylinderselektiv auslegen und mit einem Näherungssensor in die Kolbenkühldüsen integrieren lässt. Dies erfordert keine Änderung der Kolbenkonstruktion.

Aufgrund der geringen Veränderungen an den wichtigsten Motorkomponenten werden vorhandene Motormontagelinien und End-of-Line-Tests nicht wesentlich beeinflusst. Die VCR-Systemkomponenten können der Montagelinie auf die gleiche Weise wie Standardkomponenten zugeführt werden, und eine flexible Montagelinie, auf der sowohl Standard- als auch VCR-Motoren montiert werden, ist möglich. Dank seiner geringen Auswirkungen auf die Konstruktion bestehender Motoren lässt sich das Stepcom-VCR-System bestens mit anderen Technologien kombinieren.

KOMPATIBILITÄT

Derzeit ist die zunehmende Elektrifizierung konventioneller Antriebsstränge ein wichtiger Entwicklungstrend, und 48-V-Hybride werden in naher Zukunft zum Technologiestandard [1]. Daher ist zu untersuchen, wie konventionelle Technologien zur Verbesserung des Verbrennungsmotors die Gesamt-Effizienz im zunehmend elektrifizierten Antriebsstrang beeinflussen.

Die mit VCR erzielbare CO_2-Einsparung hängt vom Grad der Antriebsstrangelektrifizierung in Form der Leistung der E-Maschine oder alternativ der Batteriekapazität ab, **BILD 3**. Basis für diese Bewertung ist ein D-Segment Fahrzeug mit einem Gewicht von 1550 kg, angetrieben von einem turboaufgeladenen 1,5-l-Dreizylinder-Ottomotor mit Direkteinspritzung in Verbindung mit einem Siebengang-Doppelkupplungsgetriebe. Im WLTC hat dieses Fahrzeug eine CO_2-Emission von 137 g/km. Ein solcher Antriebsstrang bildet ein realistisches Mainstream-Szenario mit hohen Produktionsvolumen für die nächsten Jahre.

Ohne Elektrifizierung ergibt sich für den VCR-Motor im WLTC eine CO_2-Einsparung von 7,3 g/km oder 5,3 %. Bei einer Elektrifizierung bis zu 20 kW, die mit 48-V-Technologie erreichbar ist, reduziert sich die CO_2-Einsparung durch VCR auf 5,6 g/km oder 4,1 %. Hier sind elektrisches Fahren mit niedriger Last oder elektrisches Boosten bei hoher Last möglich, sodass die ungünstigsten Betriebspunkte des Verbrennungsmotors vermieden werden können. Die absolute Einsparung in g/km ist hierbei natürlich direkt vom Basismotor abhängig. Üblicherweise profitieren hubraumgrößere Motoren im Hinblick auf die absolute Einsparung in g/km in höherem Maße durch VCR.

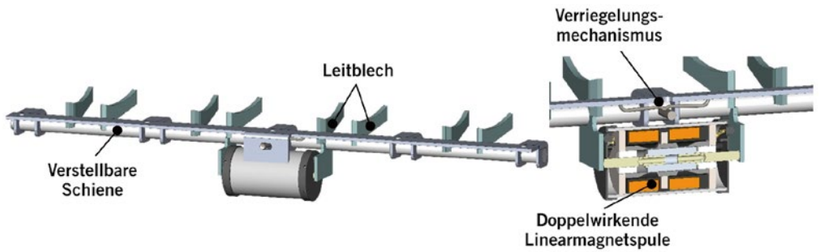

BILD 2 Aktuierungseinheit (© Hilite)

Im Bereich mittlerer Elektrifizierung für Hochvolt-Hybride nimmt die Auswirkung der Elektrifizierung ab, erkennbar am flacheren Gradienten. Die höhere elektrische Leistung ermöglicht die Substitution weiterer Motorbetriebspunkte. Dies betrifft nun aber auch solche mittlerer Effizienz, was den Elektrifizierungseinfluss reduziert. Auf der anderen Seite gibt es nach wie vor einen signifikanten Vorteil von VCR im Bereich der bestmöglichen Effizienz der VKM.

Bei Plug-in-Hybriden hängt das Einsparpotenzial vom Ladezustand der Batterie und der Anwendung ab. Durch die Möglichkeit des vollelektrischen Fahrens über lange Strecken reduzieren sich der zeitliche Anteil der Nutzung des Verbrennungsmotors und damit die Relevanz der Verbrennungsmotoreffizienz noch stärker. Im Ladeerhaltungsmodus bleibt der Gradient ähnlich wie bei mittlerem Elektrifizierungsniveau.

Bei Fahrten über lange Strecken mit 100 und 130 km/h führt das VCR-System – nahezu unabhängig vom Elektrifizierungsgrad – zu einer CO_2-Einsparung von 7,4 g/km beziehungsweise 8,5 g/km. Hier ist der Einfluss durch die Elektrifizierung aufgrund der vergleichsweise geringen Energiemenge, die in der Batterie gespeichert werden kann, stark begrenzt.

Neben der Auswirkung auf die CO_2-Emission im Zyklus ermöglicht VCR auch die Erfüllung zukünftiger Emissionsgesetzgebungen durch die Möglichkeit, den Kennfeldbereich mit stöchiometrischem Betrieb deutlich zu vergrößern. Die Nutzung von VCR lässt Steigerungen der spezifischen Leistung um bis zu 20 kW/l bei $\lambda = 1$ zu [2].

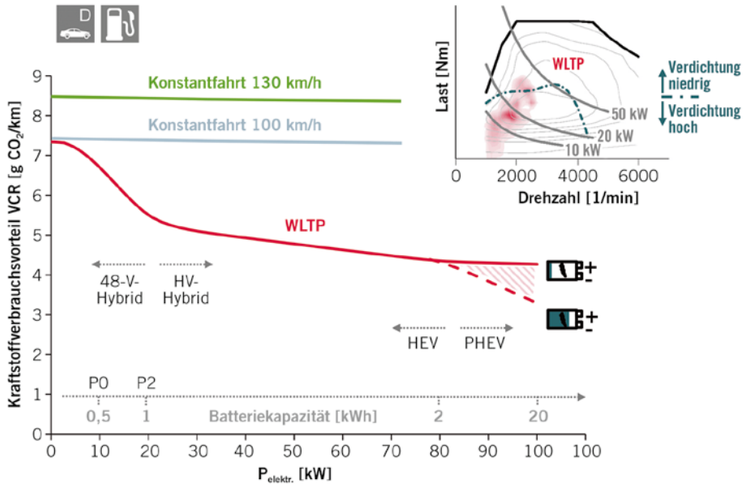

BILD 3 Kraftstoffverbrauchsvorteil des StepCom als Funktion des Elektrifizierungsgrades (© FEV)

SYSTEMVALIDIERUNG

Da ein großer Teil der Motorkomponenten unverändert bleibt, kommt ein reduziertes Validierungstestprogramm in Betracht, das lediglich auf die Grundmotorkomponenten konzentriert ist. Die Validierung des Stepcom-VCR-Systems erfolgt auf Komponentenebene sowie im gefeuerten Motorbetrieb. Resonanzpulsertests mit Schwerpunkt auf der Dauerfestigkeit werden entsprechend den Kundenspezifikationen durchgeführt.

Das Schaltventil wird – auf einer rotierenden Scheibe montiert und mit Öldruck versorgt – einer Dauerprüfung unterzogen. Der Stützkolben einschließlich Kolbendichtung wird auf einem speziellen Prüfstand mit dem realen Motorbetrieb vergleichbaren Randbedingungen validiert. Das Verschleißbild aus den gefeuerten Motoruntersuchungen konnte in verschiedenen Projekten auf Komponentenebene reproduziert werden, sodass neue Anwendungen innerhalb eines sehr großen Vertrauensbereichs möglich sind.

Die wesentliche Validierung erfolgt im gefeuerten Motorversuch. Hier gilt der Dauerhaltbarkeit bei hohen Motordrehzahlen unter Volllast und bei hohen Öltemperaturen besondere Aufmerksamkeit.

Motortests bei Nennleistung wurden in verschiedenen Projekten für insgesamt 900 h durchgeführt.

Darüber hinaus wurde ein spezieller Schalttest entwickelt, um die Zuverlässigkeit des Schaltvorgangs selbst sowie das Verschleißbild am Schaltventil und der Betätigungseinheit zu beurteilen. Eine Tieftemperaturprüfung bis -20 °C wurde ebenfalls erfolgreich abgeschlossen. Ein ergänzender Überdrehzahltest dient dazu, die Robustheit des Systems bei Motordrehzahlen über 7000/min zu gewährleisten.

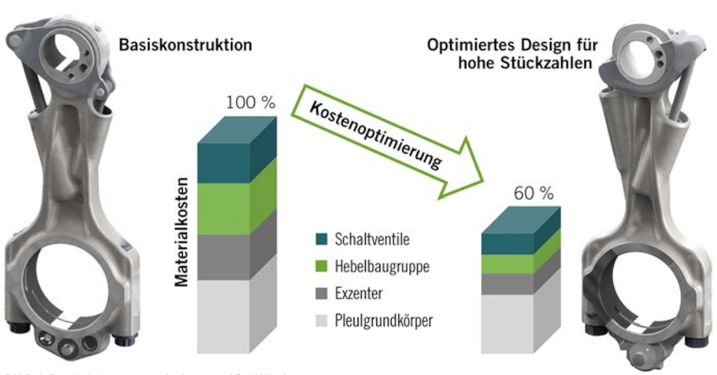

BILD 4 Produktkostenoptimierung (© Hilite)

PRODUKTKOSTENOPTIMIERUNG

Neben der Funktion muss eine neue Technologie auch die Wettbewerbsfähigkeit hinsichtlich der Kosten nachweisen. Bereits ab der Prototypenreife wurde ein „Design-to-Cost“ Ansatz mit intensiven Untersuchungen zu Designalternativen, Materialeigenschaften und Toleranzanforderungen verfolgt.

Durch ein optimiertes Hydraulikschema, vergrößerte Bohrungsdurchmesser und geänderte Materialeigenschaften wurden deutliche Kostenreduzierungen am Pleuelgrundkörper erzielt.

Der Exzenter wurde für ein Ein-Hebel-Design abgeändert, sodass sich der Bearbeitungsaufwand verringert. Zudem erfolgten Materialänderungen und Verbesserungen hinsichtlich der Beschichtung.

Bei der Hebelbaugruppe wurde der bearbeitete zweiteilige Hebel durch einen einzelnen aus dem Serienwerkzeug ersetzt. Die Stützstangen wurden so modifiziert, dass sie jetzt Kugelkopfanschlüsse anstelle bearbeiteter Teile mit Stiftbefestigung aufweisen, und das Hydrauliksystem wurde durch die Integration der Rückschlagventile in der Schaltventileinheit optimiert.

Diese Modifikationen wurden von umfangreichen Prüfungen sowohl auf Komponentenebene als auch im gefeuerten Motorbetrieb begleitet, um die Validierungsanforderungen zu erfüllen. Als Gesamtergebnis ließ sich auf Grundlage eines repräsentativen Volumenszenarios eine Kostenreduzierung von 40 % erzielt, **BILD 4**.

INDUSTRIALISIERUNG

Das Montagekonzept der Pleuel ist bei allen Anwendungen identisch. Es basiert auf der Montageerfahrung aus verschiedenen Entwicklungsprojekten, die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden zur Entwicklung der Serienfertigungsprozesse herangezogen.

Der Montageprozess erfolgt auf einer vollautomatisierten Montagelinie, die sich aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen in einer Reinraumumgebung befindet. Der Materialtransport, die Montageprozesse und die Komponentenprüfungen sind voll automatisiert. Der Montageprozess umfasst folgende Bestandteile.

- Die Hebelbaugruppe, bestehend aus Stützstangen, Kolben und Dichtungen: Beide Stützstangen sind hier mit kugelförmigen Enden versehen. Auf der Kolbenseite sind die Stangen an den Kolben angebracht und jeweils mit einem Ring befestigt, der durch Laserschweißen mit dem Kolben verbunden ist. Auf der Hebelseite wird die Stange durch eine Crimpverbindung am Hebel befestigt.
- Einer der anspruchsvollsten Montageprozesse ist die sogenannte Hochzeit der Hebelbaugruppe und des Exzenters mit dem Pleuel-Hauptkörper, **BILD 5**. Der Pleuel-Hauptkörper wird in einer Montagevorrichtung positioniert, die außerdem die Montagehilfsmittel beinhaltet, um ein leichtes Gleiten der Kolben in die Stützkammern zu ermöglichen. Schließlich wird der Exzenter von einem Roboter im Pleuel-Hauptkörper und in der Hebelbaugruppe montiert.
- Exzenter und Hebel werden mittels Laserschweißen miteinander verbunden. Das Verfahren wurde gewählt, um einen Anschluss mit hoher Festigkeit und hoher Qualität zu gewährleisten. Hilite hat den Schweißprozess bis zur Serienreife entwickelt. Die Schweißmaschine für die Serienfertigung wird auch zum Aufbau von Prototypen für verschiedene Entwicklungsprojekte auf einem sehr hohen Standard eingesetzt. Das Laserschweißen besteht aus dem Schweißvorgang selbst und der gleichzeitig durchgeführten Überwachung.
- Der Einpressvorgang des Schaltventils schließt den Montageprozess ab. Dieses beinhaltet zugleich auch die Rückschlagventile. Die entstehende Unterbaugruppe wird dann der Hauptmontagelinie zugeführt.
- Am Ende der Montagelinie erfolgt ein End-of-line Test, **BILD 6**, bei dem die Hauptfunktionen des Pleuels geprüft werden. Die Beurteilung basiert auf hydraulischen und mechanischen Prüfungen, die kritische Merkmale wie Dichtigkeit, Schaltleistung, Systemreibung und eine Kraftmessung des mechanischen Schalters überprüfen. Alle Daten werden auf dem zentralen Steuergerät aufgezeichnet.

QUALITÄT

Um ein qualitativ hochwertiges Produkt zu liefern und die individuellen OEM-Anforderungen zu erfüllen, ist am Ende der Montagelinie ein Qualitätskontrollsystem vorgesehen.

BILD 6 End-of-Line Test (© Hilite)

BILD 5 Hebel- und Exzenterbaugruppe (© Hilite)

In die Montagelinie ist ein Hochpräzisions-Messsystem integriert, um Messdaten höchster Qualität zu gewährleisten.

FAZIT

Das Stepcom VCR-System wurde in verschiedene Motorkonfigurationen integriert. Der Aufwand für die Integration und die Auswirkungen auf vorhandene Fertigungslinien sind im Vergleich zu anderen VCR-Systemen gering. Es gibt keine Auswirkungen auf das Motor-Packaging.

Neben dem CO_2-Einsparpotenzial ermöglicht die VCR-Technologie die Erfüllung der zukünftigen Emissionsgesetzgebung im Hinblick auf die Lambda=1-Fähigkeit im gesamten Motorkennfeld. Je nach dem Grad der Elektrifizierung können unter realen Fahrbedingungen CO_2-Einsparungen von bis zu 8,5 g/km erzielt werden (1,5-l-Motor, Fahrzeug der oberen Mittelklasse). Bei größeren Fahrzeugen mit größerem Hubraum erhöht sich die Einsparung deutlich.

Das Stepcom VCR-System wurde im Hinblick auf Funktionalität, Materialspezifikation und Herstellbarkeit optimiert und bei zeitgleicher Kostenreduktion von 40 % zur Serienreife entwickelt. Fertigungsprozesse wie der Schweißprozess und End-of-Line-Tests wurden entwickelt, und Montagelinien-Layouts für verschiedene Volumenszenarien stehen für einen Produktionsstart in 2023 für verschiedene Volumenszenarien zur Verfügung.

LITERATURHINWEISE

[1] Scharf, J.; et. al.: Gasoline Engines for Hybrid Powertrains - High Tech or Low Cost? 38. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2017
[2] Görgen, M., et. al: All Lambda 1 Gasoline Powertrains. 5. Internationaler Motorenkongress, Baden-Baden, 2018

READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
Test now for 30 days free of charge:
www.mtz-worldwide.com