



G. Fraidl, P. Kapus, H. Melde; S. Lösch, W. Schöffmann, H. Sorger, M. Weißböck;
J. Wolkerstorfer, AVL List GmbH, Graz

Variable Verdichtung – im Technologiewettbewerb?

37. Internationales Wiener Motorensymposium
28.+ 29. April 2016

G. Fraidl, P. Kapus, H. Melde; S. Lösch, W. Schöffmann, H. Sorger,
M. Weißbäck; J. Wolkerstorfer , AVL List GmbH, Graz

Variable Verdichtung – im Technologiewettbewerb?

Kurzfassung

Durch die verschärfte Gesetzgebung, die signifikant reduzierte Flottenverbräuche bei weitgehender Schadstofffreiheit unter nahezu allen Betriebsbedingungen fordert, wird die Notwendigkeit eines nachhaltigen Technologiesprungs bei Verbrennungskraftmaschinen deutlich gesteigert. Insbesondere beim Ottomotor stellt nach der fortschreitenden Serieneinführung von „Rightsizing“ und „Miller / Atkinson“- Konzepten die geometrisch variable Verdichtung den nächsten logischen Entwicklungsschritt dar. Allerdings führen deutliche Fortschritte bei neuen, sowohl rein technischen als auch wirtschaftlichen Wettbewerbern zu einem intensivierten Technologiewettbewerb. Insbesondere die Fragestellung, entweder auf breiter Basis und mit hohen Investitionen die Produktionsanlagen auf neue Verbrennungsmotortechnologien umzustellen oder aber bei nur evolutionärer Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors den Schwerpunkt auf Elektrifizierung zu legen, wird auch das Thema VCR nachhaltig beeinflussen.

Beschränken wir uns auf reine Motortechnologien, so haben kontinuierliche VCR- (Variable Compression Ratio) Systeme nicht nur das höchste Verbrauchs- und Mitteldruckpotential (z.B. Multi-Link), sondern auch den am weitesten fortgeschrittenen Entwicklungsstand und werden wohl auch als erste VCR Systeme in Serie umgesetzt werden. Da die Marktentwicklung der Elektrifizierung und der Quereinfluss auf die Verbrennungsmotortechnologien derzeit nur schwer quantifizierbar sind, bringt jedoch die Konzentration auf

dezidierte Einzeltechnologien ein hohes Auslastungsrisiko für die Produktionseinrichtungen. Damit ist in nächster Zeit verstärkt eine Fokussierung auf modulare Technologieansätze, die ein flexibles Reagieren auf geänderte Markterfordernisse erlauben, zu erwarten.

Diesbezüglich weisen 2-stufige VCR Systeme, Wassereinspritzung und verbesserte Aufladekonzepte wie SC (Series Compressor)-Turbo sowie auch eine weiterentwickelte Prozessführung (SPCI-Split Compression Intercooled) eine höhere Modularität und bessere Integrierbarkeit in bestehende Motorfamilien, allerdings auch ein geringeres Verbrauchs- und Mitteldruckpotential als vollvariable VCR Systeme auf.

Gerade bei den 2-stufigen VCR Systemen beschreitet AVL mit einem öldruckgesteuerten Teleskop-Pleuel neue Wege, die zwar die Beherrschung bislang ungelöster Problemstellungen erfordern, allerdings hinsichtlich Modularität, Kosten und einfacher Integrierbarkeit in bestehende Motoren neue Maßstäbe setzen.

„Miller / Atkinson“- Konzepte stellen beim Ottomotor die derzeit kostengünstigsten Verbrauchskonzepte dar und entwickeln sich zu einer dominierenden Mainstream Technologie. Der nächste Stufenprung, den Leistungs- und Mitteldruckbereich solcher Systeme auszuweiten, beginnt vorzugsweise beim Aufladesysteme selbst, wobei hier eine zweistufige Verdichtung mit Zwischenkühlung den Kernpunkt darstellt. Die dadurch signifikant verbesserte Auflade-Effizienz erlaubt es, entweder den bislang begrenzten Mitteldruck- und Leistungsbereich „konventioneller Milleransätze“ auszuweiten oder die eigentliche Verdichtung verstärkt vom Zylinder in das Aufladeaggregat zu verlagern (SPCI) und damit die Abgasenergie in kosteneffizienter Weise zu nützen.

Solche neuen Ansätze intensivieren zwar den Wettbewerb der Verbrennungsmotortechnologien, erlauben es aber auch, den Verbrennungsmotor in einer hoch modularen Ausführung effizienter an die künftig stärker differenzierten Anforderungsprofile und Elektrifizierungserfordernisse anzupassen.

Einleitung

Betrachten wir das für PKW Antriebe relevante Gesetzgebungsszenario im Zeithorizont 2020+, so wird offensichtlich dass die gleichzeitige Einhaltung der signifikant reduzierten Flotten-CO₂ bzw. CAFE (Corporate Average Fuel Economy) Vorgaben in Verbindung mit dramatisch verschärften Schadstoffemissions-Grenzwerten (z. B. RDE (Real Driving Emissions), China 6b,...) alleine mit konventionellen verbrennungsmotorischen Antrieben nicht darstellbar ist. Der Ansatz, dies primär durch erhöhten Anteil elektrifizierter Antriebe und weniger durch fokussierte Weiterentwicklung verbrennungsmotorischer Antriebssysteme zu bewerkstelligen, hat sich bereits in der Vergangenheit durch unzureichende Marktakzeptanz elektrischer Antriebe als risikoreich erwiesen.

Die weitreichenden Konsequenzen des „Dieselgates“ haben nun neue, vielfach stark emotional und politisch geprägte Facetten in den Wettbewerb zwischen den konventionellen und elektrischen Antrieben gebracht. Die Erwartungshaltung, dass im Zeitraum 2025 (plus/minus) batterieelektrische Antriebe kostenmäßig gegenüber konventionellen Antrieben wettbewerbsfähig werden, führt vielfach zur Fragestellung, inwieweit noch in einen weiteren, kosten- und investitionsintensiven Technologiesprung beim Verbrennungsmotor selbst investiert werden soll, oder aber der Schwerpunkt auf Elektrifizierung bei nur evolutionärer Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors gelegt wird. Gerade die Serieneinführung der variablen Verdichtung, die ja den nächsten logischen Schritt bei der Weiterentwicklung insbesondere des Ottomotors darstellt, steht damit im Mittelpunkt umfangreicher Diskussionen.

Status Quo

Das Thema variables geometrisches Verdichtungsverhältnis (im Folgenden mit VCR-Variable Compression Ratio abgekürzt) wird seit Jahrzehnten als echter Stufensprung der Verbrennungsmorteknologie betrachtet - durchaus vergleichbar mit dem Übergang vom Saugmotor zum aufgeladenen Motor oder von indirekter zu

direkter Einspritzung. Im Gegensatz zu diesen beiden Technologien, die sich sowohl beim Diesel- als auch beim Ottomotor als unverzichtbare „Mainstream“-Technologien etabliert haben, ist die Thematik VCR wesentlich komplexer zu betrachten. Das Statement: „VCR ist der Heilige Gral des Motorenbaus“ (Christian Chapelle, PSA, SIA Paris 2015) beschreibt den Status VCR in sehr subtiler Weise. Ein „wundertätiges Gefäß, das Glückseligkeit und ewige Jugend gewährt“ (Wikipedia) korreliert durchaus mit der technischen Erwartungshaltung; die fortwährende Suche nach dem heiligen Gral hat Parallelen zu den jahrzehntelangen Bemühungen eine kostengünstige VCR Serienlösung im Massenmarkt umzusetzen.

Die Festlegung der geometrischen Verdichtung ist seit Jahrzehnten der „klassische“ Auslegungs-Trade-Off bei der Entwicklung von konventionellen Verbrennungsmotoren. Sowohl beim Dieselmotor, aber insbesondere beim quantitativ geregelten Ottomotor stellt die geometrische Verdichtung stets einen Kompromiss zwischen Teillast- und Vollasterfordernissen dar. Der Forderung nach möglichst hoher geometrischer Verdichtung für guten Teillastwirkungsgrad stehen Klopfbegrenzungen (Ottomotor) bzw. Spitzendrucklimitierungen beim Dieselmotor sowie auch Reibleistungsaspekte entgegen. Durch den zunehmend erweiterten Mitteldruck- und Leistungsbereich nehmen die bei der Auslegung einer fixen Verdichtung einzugehenden Kompromisse zu. Beim Ottomotor wird selbst bei einer einfachen statistischen Betrachtung ausgeführter Serienmotoren ein klarer Zusammenhang zwischen maximalem Mitteldruck und geometrischem Verdichtungsverhältnis offensichtlich, Bild1.

Dabei hat der in den letzten Jahren dominante Trend zum Downsizing diesen Zielkonflikt noch zunehmend verstärkt. Gegenüber den Saugmotoren bedingen die höheren spezifischen Leistungen und Mitteldrücke der aufgeladenen Motoren ein abgesenktes Verdichtungsverhältnis an der Vollast, während der Bedarf nach hoher Verdichtung in der Teillast sich durch Verbrauchserfordernisse zunehmend verschärft. Betrachtet man die Verteilung der spezifischen Leistungen über dem Hubvolumen, so ist Hochleistung nicht mehr auf vielzylindrige Sportfahrzeuge beschränkt, Bild 2.

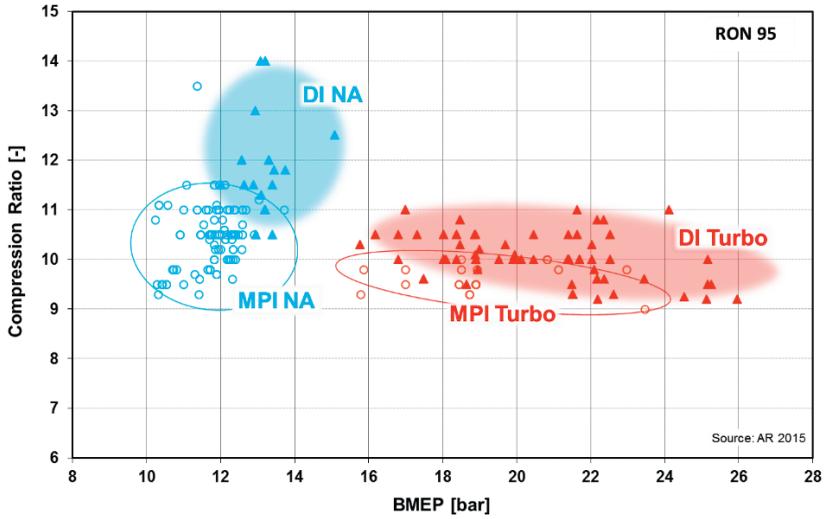


Bild 1: Zusammenhang zwischen maximalem Mitteldruck und geometrischem Verdichtungsverhältnis, Serien-Ottomotoren

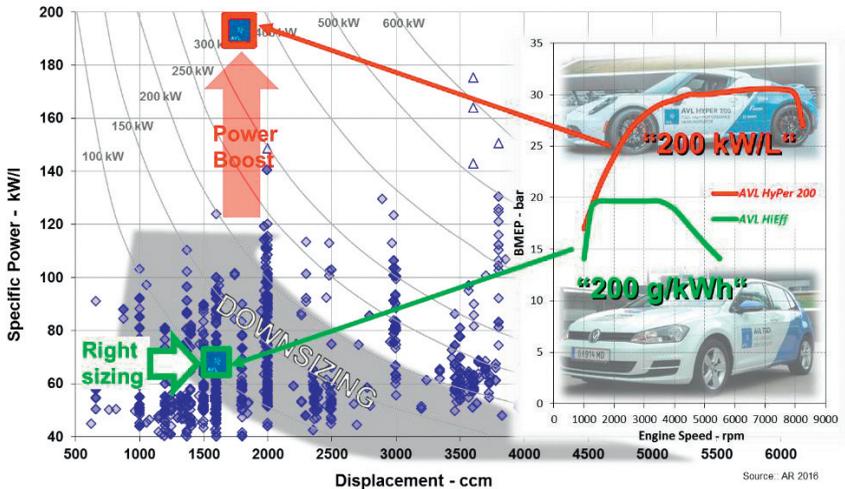


Bild 2: Spezifische Leistungen von Serien-Ottomotoren und Entwicklungstrends

Gegenüber einem ursprünglich eher homogenen Trend zu starkem Downsizing ergibt sich inzwischen eine ausgeprägte Differenzierung. Extremes Downsizing bringt zwar deutliche Verbrauchsvorteile speziell im niedriglastigen NEDC Test, weist allerdings auch Einschränkungen hinsichtlich Kundenfahrverbrauch und Ansprechverhalten auf. Der dadurch bedingte Trend zum „Rightsizing“ wird durch die RDE-Emissionsproblematik [1] nochmals verstärkt. Auf der anderen Seite führt die vielfach getroffene Festlegung auf reduzierte Zylinderzahlen und Hubräume zu einer progressiven Entwicklung der spezifischen Leistungen insbesondere bei den 4-Zylindermotoren. Für beide Extrema können die AVL-Demofahrzeuge *AVL-HiEff* und *AVL-HyPer 200* [2] als derzeitige Eckpunkte betrachtet werden.

Auslegung von Systemen für variable geometrische Verdichtung

Eine rein leistungsorientierte Betrachtung beschreibt die VCR Thematik nur unzureichend. Die eigentlichen Treiber sind nicht nur in den verschärften CO₂-Anforderungen kombiniert mit ausgeprägten Schadstoffreduzierungen und RDE sowie in hubraumorientierten Steuerklassen (z. B. China) zu sehen, sondern ergeben sich auch durch den zunehmenden Einsatz von Variabilitäten im Ventiltrieb. Insbesondere durch Steuerzeitauslegungen zur Umsetzung von Miller- oder Atkinson-Zyklen eröffnet sich ein weiteres wesentliches Auslegungskriterium für die Festlegung des geometrischen Verdichtungsverhältnisses. Vergleicht man Kennfelder mit jeweils optimalem geometrischem Verdichtungsverhältnis für Motoren mit fixem, bzw. voll variablem Ventilhub, [Bild 3](#), so verschiebt sich bei der Umsetzung einer hubvariablen Ventilsteuerung für Miller-Zyklus das jeweils optimale Verdichtungsverhältnis in der Teillast signifikant zu größeren Werten.

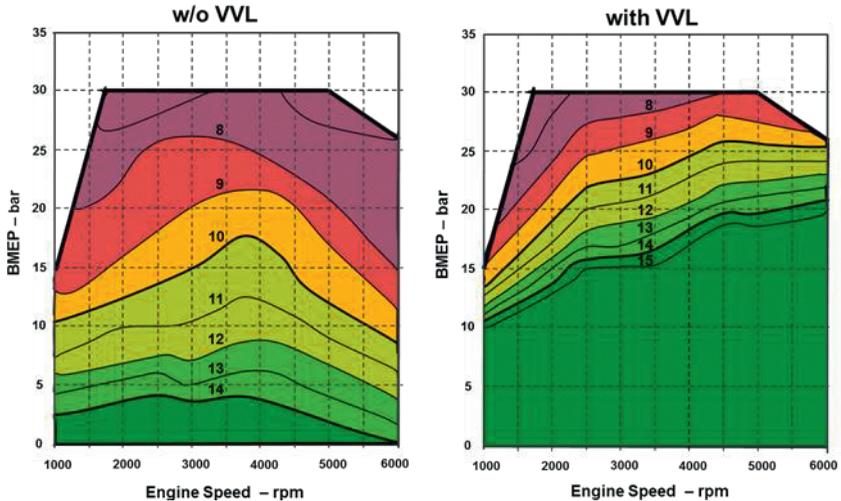


Bild 3: Ideales geometrisches Verdichtungsverhältnis bei Abgas-turboaufgeladenen Otto-Direkteinspritzmotoren mit und ohne variable Ventilhubsteuerung

Eine idealisierte, rein theoretische Betrachtungsweise würde für eine hubvariable Ventilerhebung im untersten Lastbereich sogar noch bis zu geometrischen Verdichtungsverhältnissen von 20 Wirkungsgradsteigerungen prognostizieren. In der Praxis jedoch lassen sich - abhängig vom Hub/ Bohrungsverhältnis - geometrische Verdichtungsverhältnisse von größer 14 nur mehr mit Einschränkungen umsetzen. Die dafür erforderlichen ungünstigen Brennraumgeometrien resultieren dann bereits in Nachteilen hinsichtlich des Brennverlaufes, der die theoretischen Vorteile der höheren Verdichtung vielfach überkompensiert. Zudem sind die zu berücksichtigenden Toleranzketten und der bei geometrischen Verdichtungen von $\epsilon > 16$ überproportional hohe Einfluss von Brennraumablagerungen für robuste, weltweit einsetzbare Serienlösungen als kritisch anzusehen.

Bild 4 zeigt die auf Basis eines experimentell validierten Motormodells für einen 2.0 l 4-Zylinder Otto-Direkteinspritzmotor mit konventionellem Waste-Gate-Abgasturbolader dargestellten Abhängigkeiten

der verbrauchsoptimalen geometrischen Verdichtung von der Ventilhubfunktion.

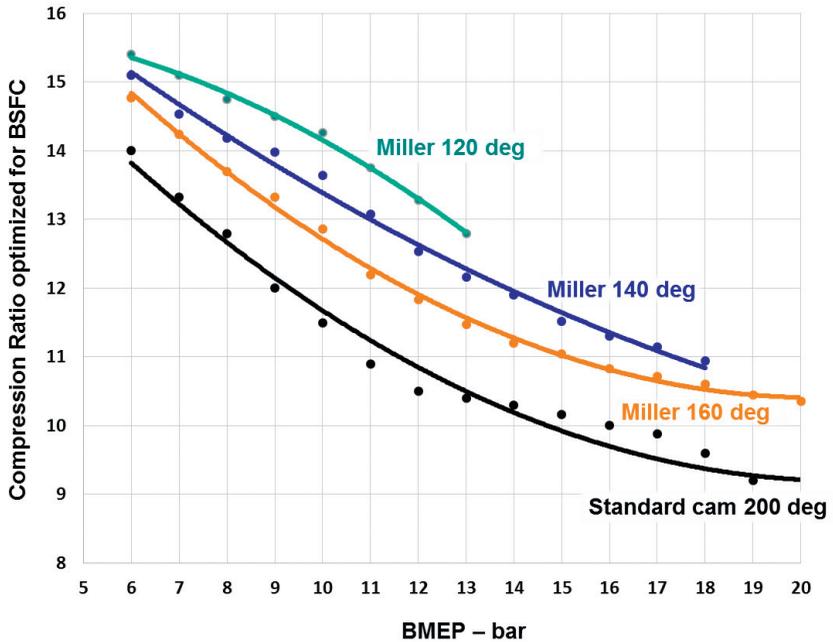


Bild 4: Verbrauchsoptimale geometrische Verdichtung abhängig von der Ventilöffnungsdauer bei verbrauchsoptimaler Nockenwellenposition

Die in Bild 4 angegebenen Ventilöffnungsdauern beziehen sich dabei jeweils auf 1 mm Ventilhub. Insbesondere kurze Ventilöffnungsdauern erfordern in Verbindung mit einem frühen Einlassschluss („ausgeprägter Miller-Zyklus“) eine entsprechende Anpassung des Verbrennungssystems. Das für die effiziente Umsetzung von geometrischen Verdichtungsverhältnissen größer 14 erforderliche frühe Schließen der Einlassventile (Öffnungsdauer < 120° bei 1 mm Ventilhub) verringert die einlassgenerierte Ladungsbewegung bereits in einem so hohen Ausmaß, dass der spezifische Kraftstoffverbrauch ansteigt. Damit ist die interaktive Optimierung zwischen Ventilhub-

funktion und geometrischer Verdichtung das zentrale Thema für die Auslegung von VCR-Systemen.

Die geometrische Verdichtung nimmt in mehrfacher Weise einen nachhaltigen Einfluss auf die Verbrennung:

- direkt gekoppelt über Verdichtungsenddruck- und -temperatur sowie über die mit der Kolbenposition verknüpfte Turbulenzgeneration, Bild 5
- Indirekt über die Festlegung des jeweils optimalen Einlass-Schluss und die dadurch beeinflusste Ladungsbewegung.

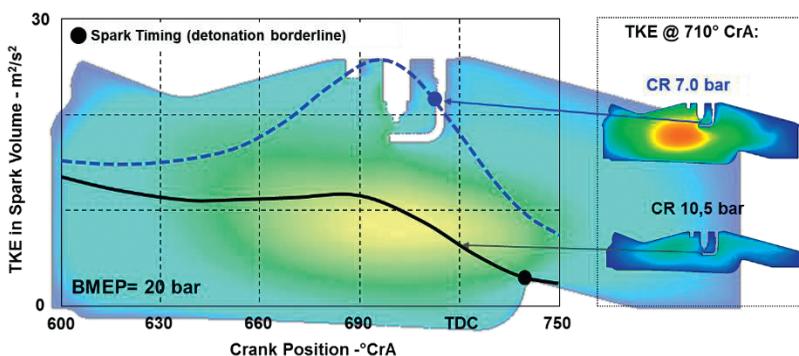


Bild 5: Einfluss des geometrischen Verdichtungsverhältnisses auf den Verlauf der turbulenten kinetischen Energie im Zündfunkenbereich, hoch aufgeladener Otto-Direkteinspritzmotor

Grundsätzlich begünstigt eine niedrigere geometrische Verdichtung eine spätere Dissipation der großflächigen Ladungsbewegung in Turbulenz was sich bei hohen Mitteldrücken und den dabei erforderlichen späten Zündzeitpunkten positiv auswirkt. Dennoch stellt die Auslegung eines für das Gesamtkennfeld optimierten Verbrennungssystems bei variabler Verdichtung eine deutlich komplexere Aufgabenstellung als bei Standardmotoren dar. Die Kombination von VCR mit Miller Zyklus vervielfacht zusätzlich den entsprechenden Aufwand.

Betrachtet man hier den anspruchsvollsten Anwendungsfall, die Kombination eines vollvariablen VCR Systems mit vollvariabler Ventilhubsteuerung, so erscheint es unwahrscheinlich mit nur einer festgelegten Brennraum- und Einlassgeometrie den sinnvollen Variationsbereich von geometrischer Verdichtung und Ventilhubposition verbrennungsoptimal abdecken zu können. Vielmehr stellt sich die Frage, inwieweit nicht auch mit der Kombination jeweils zweistufiger VCR- und Ventilhubsysteme das Potential vollvariabler Systeme mit geringerem Entwicklungs-, Kalibrier- und Bauteil Aufwand in einem wesentlichen Ausmaß erschlossen werden kann.

Als pragmatischste und beherrschbarste Lösung erscheint hier die Umschaltung zwischen zwei fixen Konfigurationen:

- hohe Verdichtung ($\epsilon > 12$) mit „Miller“-Ventilhubkurven
- Standard Verdichtung mit Vollhubkurven.

Umfangreiche Motorversuche mit vollvariablen Systemen und entsprechende Kennfeldhochrechnungen für verschiedene Fahrzeuge und Fahrzyklen lassen klar den Schluss zu, dass die umsetzbaren Verbrauchsverbesserungen weniger durch die Entscheidung kontinuierliches oder 2-stufiges VCR System, als vielmehr durch die richtige Auslegung der Verdichtungsspreizung bestimmt werden.

Während bei vollvariablen Systemen die für die einzelnen Anwendungen jeweils optimalen Verdichtungs- und Ventilhubkombinationen noch in der Kalibrierung angepasst werden können, müssen bei gestuften Systemen diese Parameter frühzeitig durch die Hardware festgelegt werden. Damit erfordert eine optimale Auslegung gestufter Systeme eine systemorientierte Betrachtung die alle potentiellen Motor- Getriebe- Fahrzeugkonfigurationen frühzeitig berücksichtigt. Da bei gestuften Systeme die Umschaltvorgänge prinzipiell verlustbehaftet sind (z.B. Hysterese), ist ein optimaler Trade-off zwischen minimaler Anzahl von Umschaltvorgängen und bestmöglicher Ausnutzung des Bereiches optimaler Einstellparameter

eine höchst anspruchsvolle Optimierungsaufgabe für die Festlegung der Verdichtungsspreizung.

AVL-Ansatz für 2-stufige variable geometrische Verdichtung

Zusätzlich zu den obigen Überlegungen war eine einfache, modulare Integrationsfähigkeit in bestehende Motorfamilien das bestimmende Auswahlkriterium für AVL, als VCR Lösung ein zweistufiges Teleskop-pleuel darzustellen, Bild 6.



- **Compression Variation**

currently **3-4 Units**

- Potential for **6 Units**

- **Length Variation**

- **2 Step Oil Pressure Variation**

- Supported by Gas- and Mass forces

- **Active** Length Control
with hydraulic locking

Bild 6: Zweistufiges Teleskop-Pleuel für variable geometrische Verdichtung

Wesentliche Punkte des Lastenhefts für den AVL-VCR Ansatz waren:

- Zweistufige Verdichtungsvariation mit einem Verstellbereich von bis zu 6 ϵ -Einheiten
- Einfache Integrierbarkeit in bestehende Motorkonzepte um ein Modulkonzept mit und ohne VCR zu ermöglichen
- Minimaler Einfluss auf das Motorpackage, Beibehaltung von Bohrung, Hub, Stichmaß und Blockhöhe und Motorgewicht.
- Konzentration der zusätzlichen Massen nahe am großen Pleuelauge primär im Bereich der rotierenden Massen und damit reduzierter Einfluss auf die oszillierenden Massen
- Minimierter Reibleistungseinfluss
- Berührungslose Betätigung über Öldruckmodulation als präferierte Lösung, alternative Betätigungen

Die eigentliche Positionsverstellung erfolgt über Gas- bzw. Massenkräfte. Über zwei unterschiedliche Öldruckniveaus wird das Teleskop in den jeweiligen mechanischen Endlagen fixiert, Bild 7.

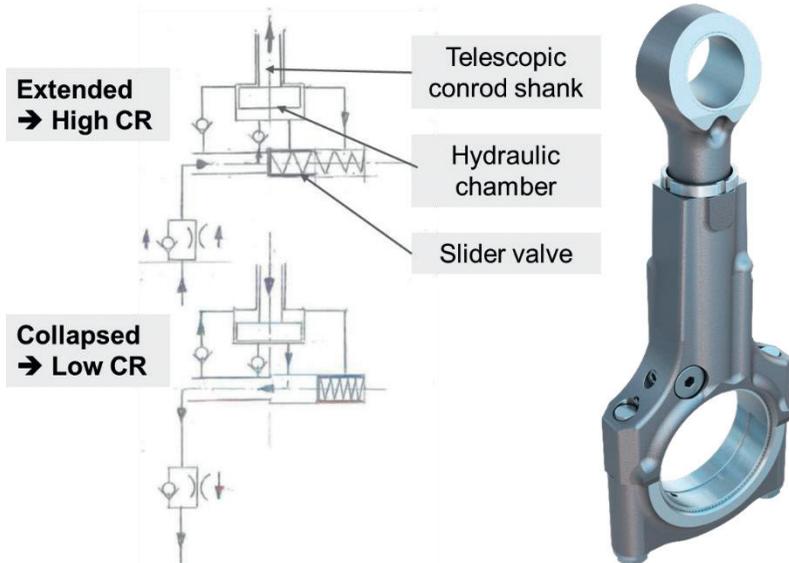


Bild 7: VCR Verstellung: Fixierung des Teleskops in den Endlagen über Modulation des Öldrucks (Prinzipskizze)

Die hydraulische Betätigung, Bild 8, stellt sowohl von der Funktion, aber auch aus Fertigungs- und Kostenaspekten die attraktivste Betätigungslösung dar, weist aber auch die höchste Entwicklungs- komplexität auf und wird vielfach sogar als technisch nicht umsetzbar eingeschätzt.

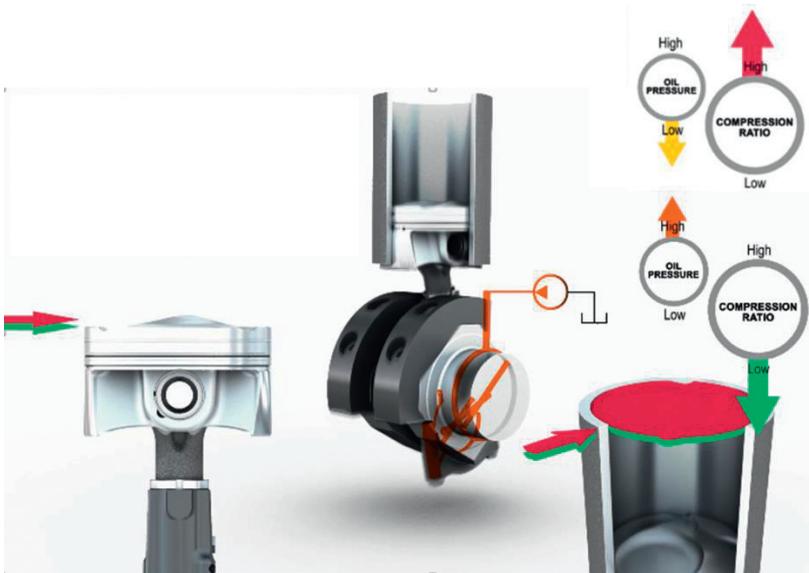


Bild 8: AVL- VCR: Funktionsprinzip der hydraulischen Verstellung

AVL ist hier auf gutem Wege, die am Einzylindermotor nachgewiesene Umschaltbarkeit, Bild 9, auch am Vollmotor zu bestätigen.

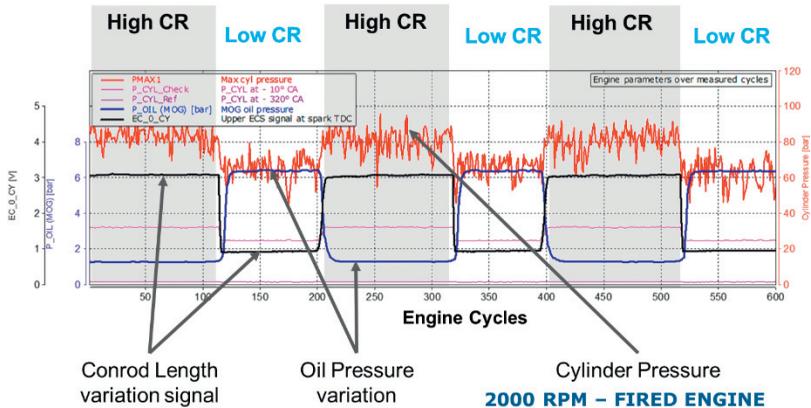


Bild 9: VCR Umschaltung am gefeuerten Einzylindermotor

Technische Wettbewerber zur geometrisch variablen Verdichtung

Die eigentliche Grundaufgabe für variable Verdichtung ist es, bei einer für Teillast ausgelegten hohen geometrischen Verdichtung im Bereich hoher Motorlasten Verdichtungsdruck und -temperatur soweit abzusenken, dass sich im Motorbetrieb weder durch Klopfen noch irreguläre Verbrennung Nachteile bzw. Zusatzrisiken ergeben. Bild 10 zeigt einen Überblick über die wesentlichsten Einzelmaßnahmen zur Absenkung von Verdichtungsdruck und -temperatur bei aufgeladenen Motoren.

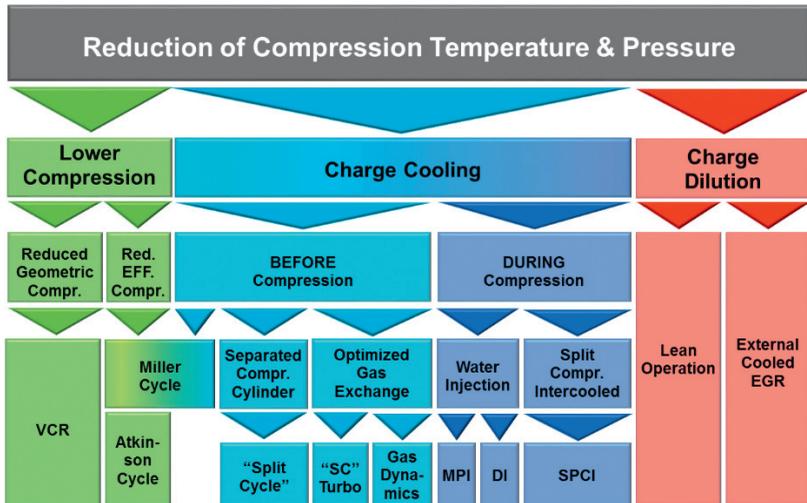


Bild 10: Maßnahmen zur Absenkung von Verdichtungsendtemperatur und druck

Miller / Atkinson Zyklus

Das Hauptziel von Ladungswechselverfahren mit extrem frühem Einlass-Schluss (Miller-Zyklus) oder spätem Einlass-Schluss (Atkinson) ist eigentlich weniger eine Absenkung der effektiven Verdichtung, sondern eine einfache Darstellung eines vergrößerten Expansionsverhältnisses. Grundvoraussetzung für die Umsetzung von Verbrauchsvorteilen ist jedoch eine ausreichend hohe geometrische Grundverdichtung, [Bild 11](#).

Miller- / Atkinson Cycle

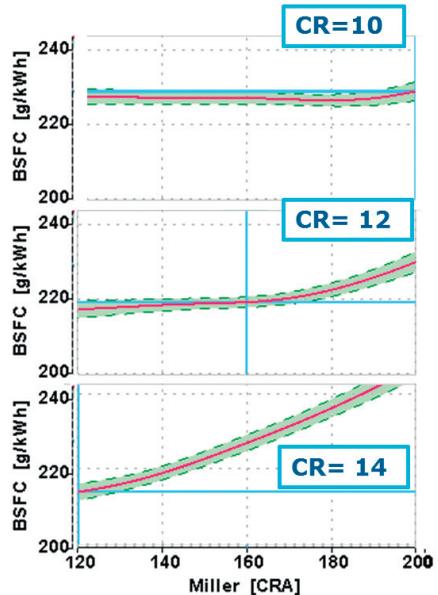
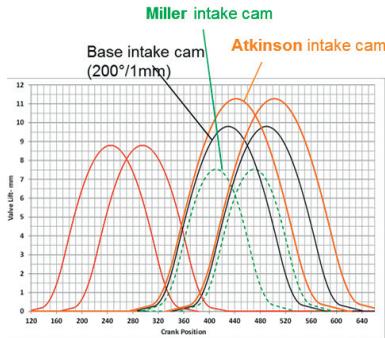


Bild11: Einfluss der geometrischen Verdichtung auf das Hochlast-Verbrauchspotential von frühen Einlass-Schluss (Miller-Zyklus)

Rein theoretisch gesehen stellt die Fähigkeit zur Reduzierung der effektiven Verdichtung über Ventilsteuerzeiten eigentlich einen Wettbewerber für geometrisch variable Verdichtung dar. Da dies jedoch nur über eine reduzierte Zylinderladung erfolgt, ist selbst in Kombination mit variablem Einlassventil-Schließen (Phasenschieber) die Funktionalität einer variablen effektiven Verdichtung nicht im physikalisch richtigen Sinn möglich. Damit wird in Zukunft insbesondere die Kombination von Miller Zyklus mit variabler Ventilhubfunktion ein zusätzlicher Treiber von Maßnahmen zur Reduzierung von Verdichtungsendtemperatur und -druck. Im Gegensatz zum Atkinson Zyklus, bei dem das Rückschieben der Ladung in den Ansaugkanal eine Erhöhung der Ladungstemperatur bringt, führt beim Miller Zyklus die Expansion nach dem frühen Einlass-Schluss zur Absenkung der Ladungstemperatur. Dabei muss bei der Auslegung der Gemischbildung die Rückkondensation von

bereits verdampftem Kraftstoff speziell bei kaltem Motor berücksichtigt werden.

Der frühe Einlass-Schluss ermöglicht es zudem, überschüssigen Ladedruck nicht durch Öffnen des Waste-Gate zu vergeuden, sondern bei entsprechender Systemauslegung als positive Ladungswechselarbeit zu nützen und stellt damit die einfachste Möglichkeit zur Abgasenergie-Rückgewinnung dar. Der frühe Einlass-Schluss hat jedoch deutlich negative Auswirkungen auf die Ladungsbewegung und erfordert eine aufwendige Optimierung des Verbrennungssystems. In einer entsprechend optimierten Variante stellt der Miller-Zyklus den mit Abstand kosteneffizientesten Ansatz zur Verbrauchsverbesserung von Turbomotoren dar [2,3], ist jedoch hinsichtlich Vollastpotential sowohl durch die hohe geometrische Grundverdichtung als auch den geringen Einlass-Ventilhub hinsichtlich spezifischer Leistung und Mitteldruck limitiert.

Wassereinspritzung

Durch die erste Serieneinführung für eine Hochleistungsanwendung [4] hat die eigentlich altbekannte Wassereinspritzung eine neue Dynamik gewonnen. Da zudem in den Fahrzeugplattformen ein entsprechendes Tankvolumen für die SCR-Abgasnachbehandlung der Dieselvarianten vorgehalten wird, hat sich die Einstiegsschwelle für weitere Serieneinführungen der Wassereinspritzung verbessert. Damit wird die Wassereinspritzung nicht nur zur Leistungssteigerung und Vermeidung des Anreicherungsbedarfes, sondern auch zur Verbrauchsreduzierung im stöchiometrischen Hochlastbereich einsetzbar, Bild 12.

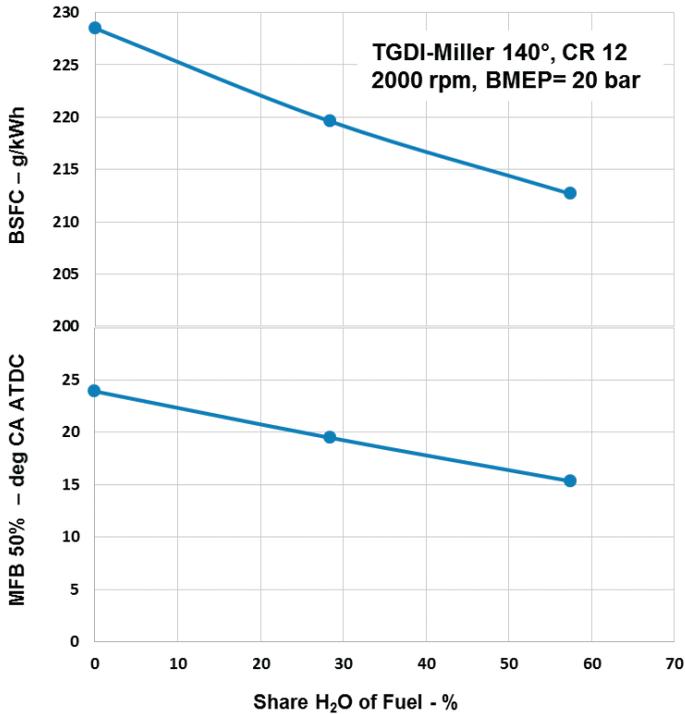


Bild 12: Einfluss einer Wassereinspritzung (MPI) auf den Hochlastverbrauch

Dabei erlaubt die deutliche Absenkung der Ladungstemperatur und damit reduzierte Klopfneigung eine günstigere klopfbegrenzte Verbrennungslage und entsprechende Verbrauchsvorteile. Zumindest bei einer MPI Version der Wassereinspritzung stellt sichere Bereitstellung ausreichender Wassermengen die Hauptherausforderung dar.

Ladungsverdünnung

Der auch bei der Wassereinspritzung als zusätzliche Klopfbremse relevante Wasserdampf ist in einem geringeren Anteil auch bei externer, gekühlter Abgasrückführung relevant. Im Gegensatz zur

Wassereinspritzung wird die Absenkung der Ladungstemperatur einerseits durch das Fehlen der Verdampfungswärme aber auch die begrenzte Rückkühlung des Abgases (Vermeidung von Kondensat) eingeschränkt. Weitere Limitierungen ergeben sich durch die deutlich höhere erforderliche Verdichterleistung. Allerdings wird gekühlte Abgasrückführung nicht nur zur Verringerung des Anreicherungsbedarfes an der Vollast, sondern auch zur Verbrauchsabsenkung im Lastbereich > 5 bar Mitteldruck verwendet.

Geänderte Prozessführung

Die durch den frühen Einlass-Schluss beim Miller-Zyklus begrenzte einlassgenerierte Ladungsbewegung stellt im Zusammenwirken mit der hohen Grundverdichtung eine signifikante Herausforderung für das Klopfverhalten dar. Unter solchen Randbedingungen reagieren Turbomotoren sehr schnell mit einer ausgeprägten „Abwärtsspirale“, Bild 13.

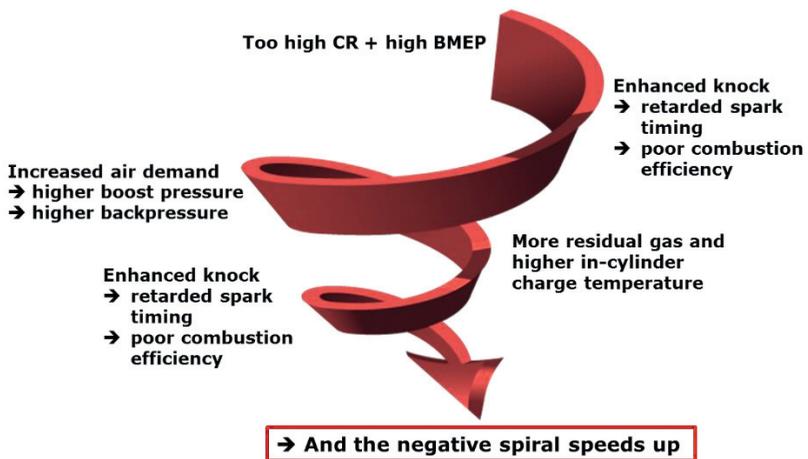


Bild 13: Negative „Turbospirale“

Das ungünstige Klopfverhalten bedingt eine deutliche Spätstellung des Verbrennungsschwerpunktes und daraus resultierend schlechten Wirkungsgrad, hohe Abgastemperatur und zusätzlichen Anreicherungsbedarf. Der dadurch erforderliche gesteigerte Luftbedarf führt über erhöhten Ladedruckbedarf und in der Folge höheren Abgasgegendruck zu höherem Restgasgehalt mit den entsprechen negativen Auswirkungen auf das Klopfverhalten und den daraus resultierenden Konsequenzen.

Vielfach reichen vergleichsweise geringe Unterschiede in den Anfangsbedingungen um die „Turbospirale“ in ihrer Richtung umzudrehen. Unter Voraussetzung eines bereits optimierten Verbrennungssystems beginnt eine zielorientierte Optimierung dieser Problemzone sinnvollerweise beim Aufladeaggregat selbst mit der Zielsetzung den erforderlichen Ladedruck mit reduziertem Abgasgegendruck zu generieren. Dabei erweist sich der Übergang von einer einstufigen auf eine zweistufige Verdichtung mit Zwischenkühlung als probates Mittel um die erforderliche Verdichterleistung zu reduzieren, Bild 14.

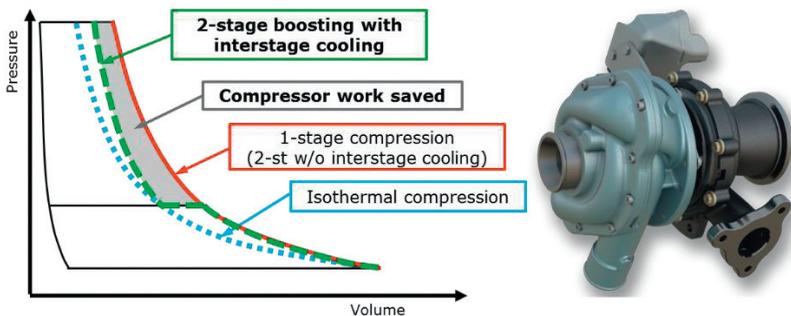


Bild 14: Zweistufiger Verdichter mit Zwischenkühlung kombiniert mit einstufiger Turbine – Honeywell SC-Lader (Series Compressor)

Durch die Kombination eines zweistufigen Verdichters mit einer nur einstufigen Turbine können die beim Ottomotor kritischen Nachteile einer zweistufigen Turbine vermieden werden. Neben dem Vorteil der

breiteren Verdichterkennfelder dreht der höhere Verdichtereffizienzgrad die „Turbospirale“ in eine positive Richtung, Bild 15.

- At same valve events: higher power
- At same power : shorter Miller cam + higher CR

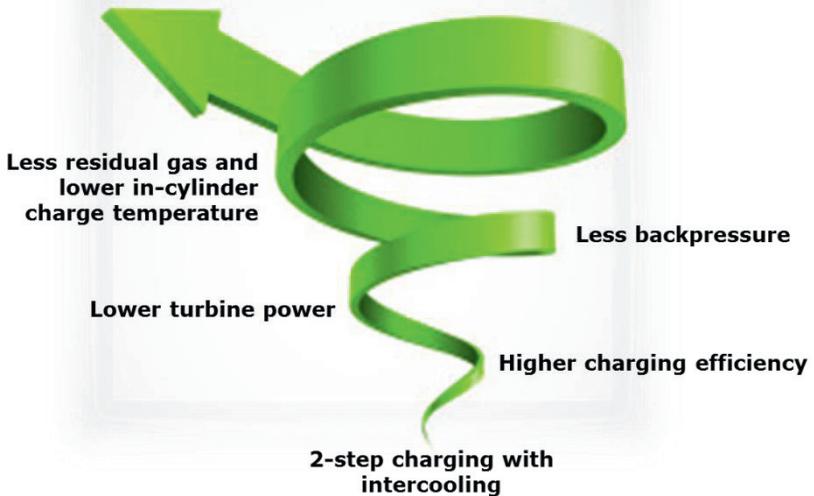


Bild 15: Positive „Turbospirale“

Die schon in Bild 13 erläuterte „Turbospirale“ wird nun in umgekehrter Richtung durchlaufen.

Die niedrigeren Verdichtungsendtemperaturen können in unterschiedlicher Weise umgesetzt werden. Bei unveränderter Auslegung der (Miller-)Steuerzeiten kann der Ladedruck und damit sowohl der effektive Mitteldruck als auch die Leistung angehoben werden. Bild 16 zeigt den Vergleich eines konventionellen einstufigen Waste-Gate Laders mit einem SC-Lader und Zwischenkühlung.

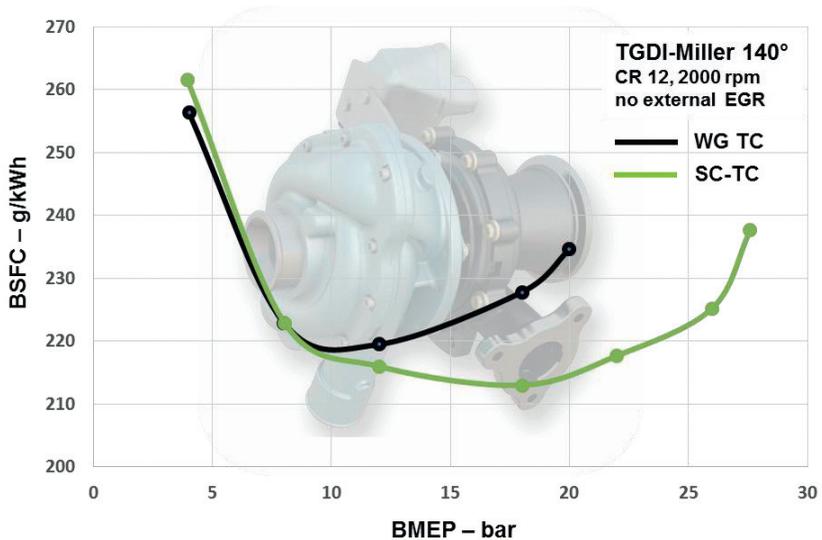


Bild 16: Vergleich unterschiedlicher Aufladesysteme, Lastschnitt bei 2000 U/min (Simulation)

Simulationsrechnungen lassen erwarten, dass das Leistungspotential einer typischen Millerauslegung (140° Nockenlänge bei 1 mm Ventilhub, Verdichtung 12) von rund 75 kW/l zumindest mit Anreicherung auf über 90 kW/l erweitert werden kann. Dies ist allerdings ebenso wie das rein stöchiometrische Leistungspotential noch am realen Vollmotor zu bestätigen.

Die alternative Möglichkeit besteht darin, bei gleicher Leistung das höhere Ladedruckpotential in einen extremer ausgelegten Miller-Zyklus mit höherer Verdichtung umzusetzen. Dabei ist die Zielsetzung weniger eine nochmals verlängerte Expansion, sondern auch die eigentlich Verdichtung zweistufig mit Zwischenkühlung zu gestalten (SPCI-Split Compression Intercooled).

Systemvergleich

Als Basis für den Vergleich der verschiedenen technischen Ansätze zur Reduzierung von Verdichtungsdruck und -temperatur wurde ein 2.0L-4 Zylinder TGDI Motor (Miller-140°, $\epsilon = 12$) gewählt. Da die den einzelnen Technologien zugrundeliegende Ergebnisse von verschiedenen Motoren stammen, wurde dieser Vergleich als Simulation durchgeführt, wobei jedoch ein bestmöglicher Abgleich mit Prüfstandsergebnissen erfolgte.

Bild 17 zeigt den Vergleich von Brennraumdruck und -temperatur während der Ansaugphase im Lastpunkt 2000 U/min, 20 bar Mitteldruck.

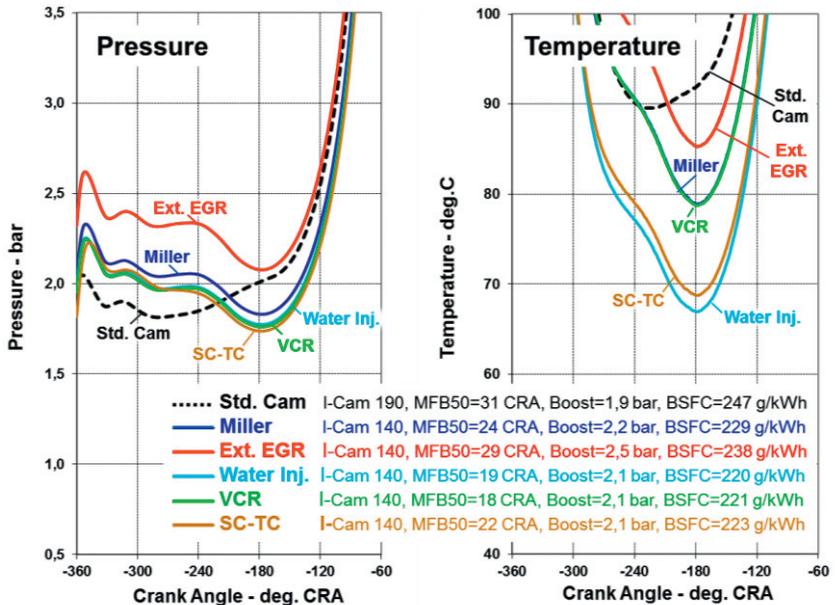


Bild 17: Vergleich von Brennraumdruck und -temperatur während der Ansaugphase - unterschiedliche Maßnahmen zur Absenkung von Verdichtungsdruck und -temperatur

Bei 2000 U/min stellen die 20 bar Mitteldruck das in der Ausgangskonfiguration (Miller-Nocke 140°, $\epsilon=12$, Standard Waste-Gate Turbolader) unter den gegebenen Randbedingungen ($\lambda=1$, Turbineneintrittstemperatur $<980^{\circ}\text{C}$) maximal erreichbare Mitteldruckpotential dar.

Die als Referenz verwendete Vollhubnockenwelle (190° Öffnungsdauer) hat zwar den niedrigsten Ladedruckbedarf, führt jedoch während der Ansaugphase durch die hohe Frischgasfüllung zu hohem Verdichtungsdruck und -temperatur, Bild 18.

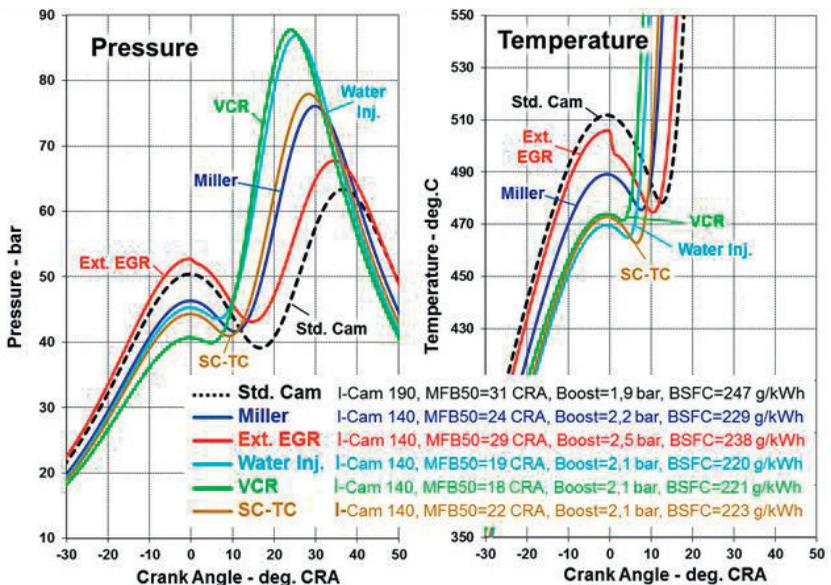


Bild 18: Vergleich von Brennraumdruck und -temperatur während der Hochdruckphase - unterschiedliche Maßnahmen zur Absenkung von Verdichtungsdruck und -temperatur

Aufgrund der dadurch bedingten späten Verbrennungslage wird unter den gegebenen Einschränkungen für Luftzahl und Turbineneintrittstemperatur der Mitteldruck von 20 bar nicht mehr erreicht.

Zwar wird bei den kürzeren Miller-Steuerzeiten der Ladedruckbedarf gegenüber der Vollhubnocke um rund 300 mbar erhöht, durch die niedrigere Abgastemperatur bleibt die Mischtemperatur ähnlich und wird durch die auf den frühen Einlass Schluss folgende Expansion noch abgesenkt. Die durch Miller um rund 20°C niedrigere Verdichtungsendtemperatur erlaubt eine frühere Verbrennungslage mit einem von 247 auf 229 g/kWh reduzierten Verbrauch.

Bedingt durch den in diesem Lastpunkt hohen zusätzlichen Laderuckbedarf von weiteren rund 300 mbar bringt in diesem speziellen Lastpunkt die externe Abgasrückführung keine nennenswerten Vorteile. Dies ist allerdings keineswegs auf das Gesamtkennfeld zu verallgemeinern, hier ergeben sich teilweise beträchtliche Vorteile durch gekühlte Abgasrückführung.

Selbst in einer Ausführungsform als Saugrohreinspritzung bringt die Wassereinspritzung eine signifikante Temperaturabsenkung die in einer früheren Verbrennungslage mit einem von 229 auf 220 g/kWh reduzierten Verbrauch resultiert.

Trotz eines anderen Wirkmechanismus bringt die variable geometrische Verdichtung (ϵ 12→9) ähnliche Temperaturabsenkungen und Verbrauchsverbesserungen wie das Einspritzen von 25% der Kraftstoffmenge als zusätzliches Wasser.

Der 2-stufige Verdichter mit Zwischenkühlung ist hier hinsichtlich Absenkung der Verdichtungsendtemperatur durchaus in einer Gruppe mit VCR und Wassereinspritzung zu sehen.

Bild 19 zeigt eine vereinfachte Bewertung der unterschiedlichen Systemansätze, die sich allerdings nicht nur auf den beispielhaft erläuterten Lastpunkt beschränkt.

	Variable Geometric CR	Miller / Atkinson	Water Injection	Split Compression Intercooled	Charge Dilution
Reduced Compression Temperature & Pressure	++(+)	++	++	++	+
Extended Expansion Ratio	0	++	0	0	0
Impact on charge motion	-	---	-	0	--
Low end torque	++(+)	--	++	0	--
Power	+	-	+	+	--
Transient response	+	--	0	0	-
Impact on engine architecture	--(-)	0	0	-	0
Impact on heat rejection	0	0	0	--	-
Add. Fluid	0	0	---	0	0

Bild 19: Bewertung unterschiedlicher Maßnahmen zur Absenkung von Verdichtungsenddruck und –temperatur

Erwartungsgemäß zeigt die kontinuierlich variable geometrische Verdichtung zwar das größte Verbesserungspotential, aber ebenso auch den höchsten Entwicklungs-, Bauteil- und Integrationsaufwand. Zweistufige VCR Systeme liegen zwar im Verbesserungspotential etwas niedriger, sind jedoch hinsichtlich Aufwand und Integrierbarkeit wesentlich günstiger. Insbesondere das Teleskop-Pleuel zeichnet sich durch hohe Modularität aus. Wassereinspritzung und zweistufiger Kompressor mit Zwischenkühlung kommen sich in Einzelaspekten erstaunlich nahe wobei der zweistufige, zwischengekühlte Kompressor für den Kunden praktisch unmerklich ist, die Wassereinspritzung jedoch die Nachfüllbereitschaft erfordert.

Schlussfolgerungen

Durch die verschärfte Gesetzgebung, die gleichzeitig reduzierte Flottenverbräuche und weitgehende Schadstofffreiheit unter nahezu allen Betriebsbedingungen fordert, wird die Notwendigkeit eines nachhaltigen Technologiesprungs bei Verbrennungskraftmaschinen noch deutlich gesteigert. Insbesondere beim Ottomotor stellt nach der fortschreitenden Serieneinführung von „Rightsizing“ und „Miller / Atkinson“- Konzepten die geometrisch variable Verdichtung den nächsten logischen Entwicklungsschritt dar. Allerdings führen deutliche Fortschritte bei neuen, sowohl rein technischen als auch wirtschaftlichen Wettbewerbern zur variablen geometrischen Verdichtung zu einem intensivierten Technologiewettbewerb.

Insbesondere die Fragestellung, entweder auf breiter Basis und mit hohen Investitionen die Produktionsanlagen auf neue Verbrennungsmotor Technologien umzustellen, oder aber den Schwerpunkt auf Elektrifizierung bei nur evolutionärer Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors zu legen, wird auch das Thema VCR nachhaltig beeinflussen. Kontinuierliche VCR Systeme (z.B. Multi-Link) haben nicht nur das höchste Verbrauchs- und Mitteldruckpotential, sondern auch den am weitesten fortgeschrittenen Entwicklungsstand und werden auch als erste VCR Systeme in Serie umgesetzt werden. Der bei solchen Systemen deutlich geänderte Kurbeltrieb bringt jedoch Einschränkungen hinsichtlich der Modularität.

Zumindest ein 2-stufiges VCR System, Wassereinspritzung, verbesserte Aufladekonzepte wie SC (Series Compressor)-Turbo und weiterentwickelte Prozessführung (SPCI-Split Compression Intercooled) weisen zwar ein geringeres Gesamtpotential, aber eine wesentlich höhere Modularität und bessere Integrierbarkeit in bestehende Motorfamilien auf.

Ein zusätzlicher Quereinfluss ist auch aus der Elektrifizierung, und hier insbesondere aus dem Thema 48V Systeme zu erwarten, die zwar keine direkten technischen Wettbewerber zu den

Motormaßnahmen darstellen, sehr wohl aber in wirtschaftlichem Sinn mit Motormaßnahmen konkurrieren – vor allem bei der Fragestellung mit welchem Technologiemitmix die zukünftigen Flotten-CO₂ Werte mit minimalen Kosten dargestellt werden können.

Ein kostenoptimaler Technologiemitmix ist natürlich von einer Vielzahl anderer Parameter, wie z.B. dem Fahrzeugportfolio, den jeweiligen Produktionsvolumina und globalen Verkaufsprofilen, bestimmt. Da sich diese Randbedingungen für die einzelnen OEM's sehr stark differenzieren, ist davon auszugehen, dass sich auch in Zukunft kein einheitlicher Technologietrend ergibt, sondern die Technologievielfalt noch gesteigert wird.

Literatur

- [1] Fraidl, G.; Kapus, P.; Vidmar, K.: "The Gasoline Engine and RDE- Challenges and Prospects" 16. Int. Stuttgarter Symposium 15.-16. März 2016
- [2] Kapus, P.; Neubauer, M.; Fraidl, G.: „Die Zukunft des stöchiometrischen Ottomotors –Minimaler Verbrauch und hohe Leistung“, MTZ 11/2014
- [3] Wurms, R.; Budak, R.; Grigo, M.; Mendl, G.; Heiduk ,T.; Knirsch, S.: "Der neue Audi 2.0l Motor mit innovativem Rightsizing – ein weiterer Meilenstein der TFSI Technologie; Wiener Motorensymposium 2015
- [4] Böhm, M.; Mährle, W.; Bartelt, H.C.; Rubbert, S.: "Functional Integration of Water Injection into the Gasoline Engine", MTZ 01/2016