

Fahrzeugklassen-spezifische Ottomotorkonzepte

Die Reduktion der CO₂-Emissionen und damit des Kraftstoffverbrauches von Fahrzeugen mit Ottomotor stellt in den kommenden Jahren eine der Hauptaufgaben der Antriebsstrang-Entwicklung dar. Dabei steht sowohl die Entdrosselung des Ottomotors als auch die Verschiebung des Lastkollektivs in verbrauchsgünstige Kennfeldbereiche im Vordergrund. Neben weitgehend bekannten Einzelmaßnahmen werden verstärkt Technikkombinationen zu betrachten sein. Die Serieneinführung solcher verbrauchsreduzierender Techniken wird sowohl durch deren Produktionserfordernisse, die notwendige Abgasnachbehandlung und deren Einsatzrisiken sowie die Relation zwischen Verbrauchsminderung und Mehrkosten bestimmt. Besonders in dieser Hinsicht zeigt eine von der AVL durchgeführte Studie in den einzelnen Fahrzeug- bzw. Hubraumklassen deutlich unterschiedliche Bewertungen der verschiedenen Techniken zur Verbrauchsreduzierung.

I Einleitung

Durch die Forderungen des Europäischen Parlamentes sowie die Zusage der ACEA werden in den nächsten Jahren Reduktionen der CO₂-Flottenemissionen erforderlich. Vor allem im Vergleich zur tatsächlichen Entwicklung der Flottenverbräuche in den letzten Jahren wird der immense Handlungsbedarf ersichtlich. Dabei stellen die gleichzeitig verschärften Grenzwerte für die „konventionellen“ Schadstoffe HC, NO_x, CO und Partikel entsprechend EU 4 eine zusätzliche Herausforderung dar.

Die notwendigen Verbrauchsverbesserungen sind dabei nur in Kombination von fahrzeug- und motorseitigen Maßnahmen möglich. Vor allem auf der Fahrzeugseite werden jedoch mögliche Maßnahmen (zum Beispiel kleinere, leichtere Fahrzeuge) durch Kundenbedürfnisse wie gesteigerte Ansprüche hinsichtlich Komfort, Sicherheit und Transportkapazität deutlich eingegrenzt. Damit hat der wesentliche Anteil der Verbrauchsreduzierung im Bereich Motor/Antriebsstrang zu erfolgen.

Neben vielfältigen Möglichkeiten im Bereich des Antriebsstranges, die von automatisierten Schaltgetrieben, CVT über verschiedene Anwendungen von Kurbelwellen-Starter-Generatorsystemen bis zum Voll-Hybrid reichen, müssen auch beim

Verbrennungsmotor essentielle Fortschritte hinsichtlich Verbrauch und Emission dargestellt werden.

Während beim Dieselmotor die Hauptanforderung darin besteht, sein günstiges Verbrauchsverhalten durch erforderliche Verbesserungen bei Abgas und Geräusch nicht zu verschlechtern, ergeben sich beim Ottomotor selbst unter zukünftigen Emissionsszenarien noch deutliche Verbrauchspotentiale.

2 Ansätze zur Verbrauchsabsenkung

Für die Kraftstoffverbrauchsabsenkung des Ottomotors wurde eine Vielzahl von Techniken entwickelt, die teilweise bereits kurz vor einem möglichen Serieneinsatz stehen. Die unterschiedlichen Einzeltechniken nützen dabei vielfach die gleichen physikalischen Wirkmechanismen:

- Verringerung der Drosselverluste
- Verbesserung des Hochdruckwirkungsgrades
- Verminderung von Verlustleistungen
- Verschiebung des Lastkollektivs in verbrauchsgünstige Bereiche.

Dabei werden die Verbrauchsverbesserungspotentiale der Einzeltechniken mit teilweise stark unterschiedlichem Aufwand in den Bereichen Mechanik, Ge-

mischbildung, Abgasnachbehandlung und Steuerung erreicht und sind daher nicht nur im Hinblick auf die Kosten/Nutzen-Relation, sondern auch bezüglich der großserientauglichen Umsetzbarkeit, des Einsatzrisikos und der Produktionserfordernisse kritisch zu analysieren.

Während die später zu betrachtende Kosten/Nutzen-Relation wesentlich von der jeweiligen Fahrzeugklasse beeinflusst ist, sollen hier zunächst Wirkmechanismen und Umsetzbarkeit der Einzeltechniken zusammengefasst werden.

Die Verfasser

Dr. Günter K. Fraidl ist Technologieleiter Ottomotoren Antriebssysteme Pkw bei der AVL List GmbH, Graz.



Paul Kapus ist Projektleiter im Bereich Antriebssysteme Pkw bei der AVL List GmbH, Graz.



Walter Piock ist Projektleiter im Bereich Antriebssysteme Pkw bei der AVL List GmbH, Graz.



Martin Wirth ist Projektleiter im Bereich Antriebssysteme Pkw bei der AVL List GmbH, Graz.



3 Variable Ladungsbewegung

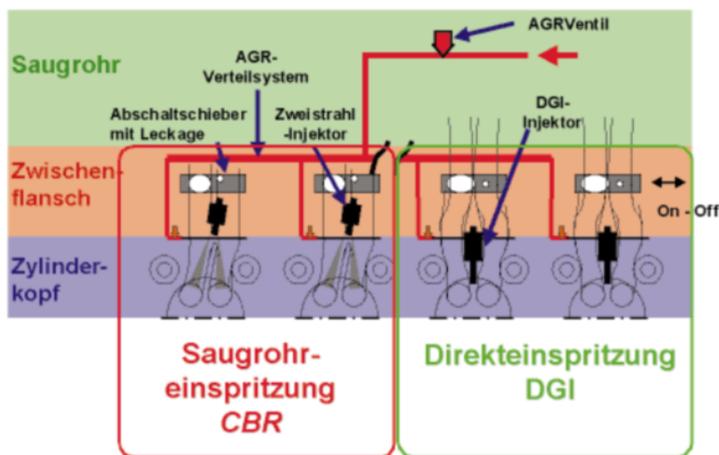
Die für eine effiziente Verbrennung erforderliche Ladungsbewegung ist beim homogenen Ottomotor in hohem Maße von Motorlast und Luftzahl abhängig. Während eine fixe Ladungsbewegung als Kompromiss zwischen Vollast- und Teillasterfordernissen ausgelegt werden muss, erlauben Systeme mit variabler Ladungsbewegung jeweils unterschiedlich angepasste Einzeloptimierungen. Damit kann auch im homogenen Teillastbetrieb eine deutliche Entdrosselung durch Abmagern oder Abgasrückführung unter Beibehaltung günstiger Verbrennungseigenschaften (Stabilität und kurze Verbrennungsdauer) dargestellt werden.

Eine Variation der einlassgenerierten Ladungsbewegung hinsichtlich ihres Drall- und Tumble-Anteils kann sowohl durch Saugrohrreinbauten (Klappen) als auch mittels Ventilhubvariation erfolgen. Die produktionstechnisch robusteste und kostengünstigste Lösung stellt dabei eine Kanalabschaltung mittels Drallklappe oder Flachschieber dar. Da sich für Saugrohreinspritzung und Direkteinspritzung durchaus ähnliche Anforderungen ergeben, kann durch modularen Aufbau von Saugrohr und Kanalabschaltung ein hoher Gleichteilanteil für beide Motorvarianten dargestellt werden, **Bild 1**.

Bei entsprechender Systemauslegung [1] (Einlasskanalgeometrie, Überströmquerschnitte, definierte Klappenleckage) ergeben sich bei Motoren mit Vierventiltechnik und zentraler Zündkerzenlage auch hinsichtlich des Verbrennungsverhaltens Vorteile gegenüber einer rein symmetrischen Variation der Tumbleströmung. Die Überlagerung einer ausgeprägten Drallströmung mit dem Tumble führt im Bereich der Zündkerze zu hoher Turbulenz bei gleichzeitig niedriger Grundströmung und damit zu günstigen Entflammungsbedingungen. In den Randbereichen hingegen wird durch eine stark ausgeprägte Grundströmung ein rasches symmetrisches Durchbrennen der Ladung erreicht. Dadurch gewährleistet ein solches Brennverfahren nicht nur hohe Toleranz gegenüber Ladungsverdünnung durch Abmagern beziehungsweise hohe Abgasrückführaten, sondern auch eine hervorragende Verbrennungsstabilität bei spätem Zündzeitpunkt. Die dadurch möglichen Katalysator-Heizfunktionen (extreme Spätzündung selbst bei Magerbetrieb) erlauben die Darstellung von Niedrigemissionskonzepten bis hin zu ULEV ohne ko-

Bild 1: Variable Ladungsbewegung durch Kanalabschaltung – modulares Konzept für Saugrohreinspritzung (AVL-CBR = Controlled Burn Rate) und Direkteinspritzung (AVL-DGI)

Figure 1: Variable charge motion by port deactivation – a modular concept for port fuel injection (AVL-CBR = Controlled Burn Rate) and direct gasoline injection (AVL-DGI)



stenintensive Zusatzmaßnahmen wie Sekundärluft oder elektrisch beheiztem Katalysator.

Vorteile hinsichtlich der Rohemissionen ergeben sich insbesondere bei nicht betriebswarmem Motor daraus, dass die Wandfilmbildung sowohl im Saugrohr als auch im Zylinder durch entsprechende Auslegung von Einspritzstrahlcharakteristika und Einspritzzeitpunkt verringert werden kann.

Durch saugsynchrone Einspritzung am Beginn der Ansaugphase kann eine Ladungsschichtung mit Kraftstoff vorwiegend in Kolbennähe initiiert und durch die ausgeprägte Drallströmung über den Ansaugvorgang hinaus aufrecht erhalten werden. Dadurch ist eine weitere Entdrosselung durch spätes Schließen der Einlassventile möglich, ohne dass ungünstiges Rückschieben von flüssigem Kraftstoff ins Saugrohr und daraus resultierende Nachteile im Transientbetrieb auftreten. Durch diese zusätzli-

che Entdrosselung sind sowohl bei Magerbetrieb als auch bei stöchiometrischem Betrieb mit Abgasrückführung weitere Verbrauchsvorteile möglich, **Bild 2**.

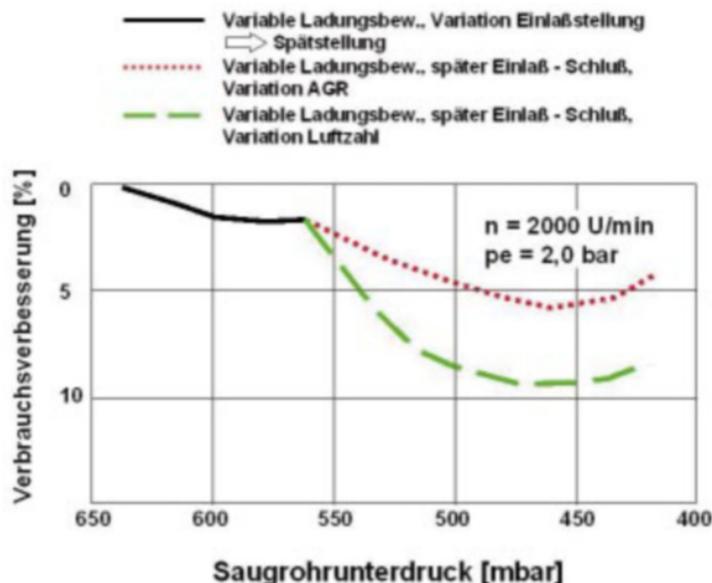
4 Variable Ventilsteuerung

Das Spektrum der variablen Ventilsteuerungen reicht von einfachen Phasenschiebern über Hubverlaufumschaltungen bis hin zu vollvariablen Systemen, die entweder auf rein mechanischer, elektrohydraulischer oder elektromechanischer Basis vielfältige Freiheitsgrade bei der Gestaltung des Ventilhubverlaufes erlauben. Damit kann ein breiter Funktionsumfang abgedeckt werden:

- Verbesserter Vollast-Luftaufwand durch drehzahlabhängig angepasste Steuerquerschnitte
- Steuerung des Restgasgehaltes
- Verlustarme Füllungsregelung
- Ventil-/Zylinderabschaltung

Bild 2: Entdrosselung durch spätes Einlassschließen, Saugrohreinspritzung mit AVL-CBR

Figure 2: Dethrottling by late intake valve closing, port injection with AVL CBR



- Beeinflussung von Ladungsbewegung und Gemischbildung über entsprechende Ventilhubgestaltung.

Die „einfachen“ Systeme wie Phasenschieber und Hubverlaufumschaltung sind heute schon als Standardlösungen anzusehen und tragen in gewissem Umfang auch zur Verbrauchsreduzierung bei. Als eigentliche Verbrauchskonzepte sind jedoch die mechanisch variable Ventilhubsteuerung, bei der eine verlustarme Füllungsregelung über frühes Schließen der Einlassventile erfolgt [2, 3], sowie die elektromechanische Ventilsteuerung [3,4,5] anzusehen, die zusätzliche Möglichkeiten zur Füllungsregelung und Beeinflussung von Ladungsbewegung und Gemischbildung aufweist.

Sowohl die Verbrauchspotentiale als auch die Systemkosten sowie die Beherrschung von Serien- und Betriebstoleranzen werden derzeit noch sehr unterschiedlich eingeschätzt. Die Vielzahl der Freiheitsgrade, die einerseits zwar zusätzliche Möglichkeiten offerieren, andererseits aber auch den Applikationsaufwand deutlich erhöhen, haben insbesondere bei der elektromechanischen Ventilsteuerung deutliche Auswirkungen auf die Funktionalitäten der Motorsteuerung, deren Applikation sowie die Diagnose-Erfordernisse.

5 Variable Verdichtung

Mit zunehmendem erreichbarem Luftaufwand muss das Verdichtungsverhältnis des Ottomotors verstärkt im Hinblick auf Klopfbegrenzung und weniger auf optimalen Teillastverbrauch hin ausgelegt werden.

Vor allem bei aufgeladenen Motoren ergibt sich aus dieser Einschränkung ein deutliches Verbrauchspotential für eine variable Verdichtung. Eine solche Variabilität kann grundsätzlich auf zwei Arten erreicht werden:

Aus rein thermodynamischer Sicht stellt eine variable geometrische Verdichtung das anzustrebende Ideal dar. Insbesondere in Verbindung mit Aufladung können auf Prototypbasis hervorragende stationäre Verbrauchsverbesserungen dargestellt werden. Bei konventioneller Auslegung des Antriebsstranges und der entsprechend hohen Lastdynamik sind jedoch für eine ausreichend schnelle Verstellung hohe Betätigungskräfte erforderlich welche die Gesamtenergiebilanz nachhaltig verschlechtern. Zusätzlich wirkt sich der hohe mecha-

nische Bauteilufwand sowohl hinsichtlich der Reibleistung als auch der Systemkosten negativ aus.

Mit wesentlich geringerem Zusatzaufwand lassen sich Systeme darstellen, bei denen unter konstanter geometrischer Verdichtung, zum Beispiel durch Variation des Verdichtungsbeginnes, die effektive Verdichtung variiert wird. Dies kann beispielsweise über variable Ventilsteuerzeiten (später Einlass-Schluss) mittels serienmäßig verfügbarer Komponenten dargestellt werden. Da durch das späte Schließen der Einlassventile ein Teil der Frischladung in das Saugrohr zurückgeschoben wird, ist ein solcher Ansatz nur in Verbindung mit einer Aufladung und bei Kompensation dieses Liefergradverlustes durch höheren Ladedruck sinnvoll [7]. Bei konventioneller Saugrohreinjection ergeben sich weitere Begrenzungen dadurch, dass nicht nur Frischluft, sondern auch flüssiger Kraftstoff in das Saugrohr zurückgeschoben wird und im Extremfall Kraftstoff-Fehlverteilung auftreten. Da dieses Problem durch Direkteinspritzung deutlich verringert wird, ist ein solches Konzept insbesondere in Verbindung mit dieser attraktiv.

6 Downsizing durch Aufladung

Die wirksamste motorseitige Maßnahme zur Lastpunktverschiebung stellt Downsizing in Verbindung mit Aufladung dar. Dabei werden jedoch die Systemeigenschaften wesentlich vom Aufladeaggregat bestimmt.

- Die Mechanische Aufladung gewährleistet zwar gutes Ansprechverhalten, erfordert jedoch entsprechend hohe mechanische Antriebsleistung. Sowohl hinsichtlich der Aufladeaggregate und deren wirkungsgradoptimaler Regelung als auch bezüglich einer Abgasrückführung im Teillastbereich ergeben sich noch Probleme.

- Die Abgasturboaufladung ist aus thermodynamischer Sicht zu bevorzugen. Erwartete Schwachpunkte wie verzögertes Katalysator-Light-Off durch die thermische Zusatzmasse erweisen sich als weniger kritisch. Von größerer Bedeutung ist jedoch die vor allem bei Downsizingkonzepten mit manuellem Getriebe vielfach feststellbare Anfahrschwäche. Obwohl sich die Turboladertechnik hinsichtlich des dynamischen Verhaltens in den letzten Jahren enorm verbessert hat, bestimmt bei Downsizingkonzepten weniger der erreichbare Volllastmitteldruck, sondern vielmehr das dynamische Ansprechverhalten das sinnvolle Ausmaß der Hubraumverkleinerung.

7 Direkteinspritzung-Ladungsschichtung

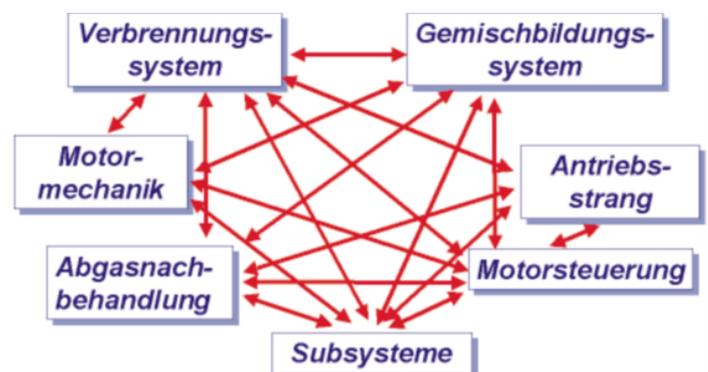
Die Direkteinspritzung stellt die einzige Technik dar, die eine vollständige Entdrosselung des Ottomotors durch die Ladungsschichtung ermöglicht.

Damit hat die Direkteinspritzung zwar das höchste theoretische Verbrauchspotential, weist jedoch insbesondere bei der Darstellung niedriger Emissionswerte eine hohe Systemkomplexität mit vielfältigen Interaktionen zwischen den einzelnen Systemkomponenten auf, **Bild 3**.

In der ersten Generation von Motoren mit Direkteinspritzung wurde das Augenmerk dabei stark auf das Brennverfahren gelegt. Aufgrund der in vielen Punkten noch unzureichenden Anpassung weiterer Motor-komponenten und der Steuerung ergab sich im Zuge der Serienentwicklung solcher Systeme nach einer anfänglich überzogenen Erwartungshaltung eine deutliche Ernüchterung. Während vor einigen Jahren Verbrauchsreduzierungen von rund 20 % gegenüber dem damaligen Stand der Tech-

Bild 3: Systeminteraktionen Direkteinspritzung

Figure 3: System interactions with direct injection



nik erwartet wurden, die Lösung der Emissionsanforderungen hingegen noch nicht abzusehen war, stehen wir heute vor einer nahezu umgekehrten Situation. Die prinzipielle Darstellbarkeit von Emissionen entsprechend EURO 4 ist mit schwefelarmem Kraftstoff nachgewiesen [6], **Bild 4**. Die Einhaltung dieser Grenzwerte über hohe Laufstrecken im Feld hingegen muss noch abgesichert werden.

Unter diesen Emissionsrandbedingungen liegt das derzeit darstellbare Verbrauchspotential noch unter der ursprünglichen Erwartungshaltung. Der Großteil des noch nicht umgesetzten Verbrauchspotentials ist dabei auf Maßnahmen zurückzuführen, die für ein Unterschreiten von EURO-3- und EURO-4-Emissionsgrenzwerten erforderlich sind.

In geringerem Ausmaß ergeben sich Abstriche auch in den Bereichen Verbrennung, Reibung und Motorsteuerung. Sowohl durch Optimierung der Einzelkomponenten als auch durch verbesserte Berücksichtigung der Systeminteraktionen ist eine kurzfristige Darstellung von rund 15 % Verbrauchsverbesserung gegenüber dem Stand der Technik (Saugrohreinjection, stöchiometrische Verbrennung und AGR) auch unter Serienrandbedingungen realistisch, **Bild 5**.

Die zu ergreifenden Maßnahmen zielen dabei vorrangig auf eine Optimierung des Emissions/Verbrauchs-Trade-Off sowie der Funktionen für Abgasnachbehandlung, transiente Übergänge und Motorstart.

Abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall ergeben sich natürlich Verschiebungen gegenüber den in Bild 5 für eine konkrete Anwendung abgeleiteten Relationen. Die ursprünglich erwarteten 20 % bis 25 % Verbrauchsverbesserung sind gegenüber einer heutigen realistischen Vergleichsbasis unter EURO-4-Randbedingungen mit der Direkteinspritzung allein nicht darstellbar.

Derart hohe Verbrauchsreduzierungen sind nur durch sinnvolle Kombination von Einzeltechniken zu erreichen.

8 Technikkombinationen

Betrachtet man die kurz- und mittelfristig umsetzbaren Potentiale von Einzeltechniken, **Bild 6**, so zeigt sich deutlich, dass mit keiner Einzeltechnik alleine die erforderliche CO₂-Absenkung dargestellt werden kann.

Bild 4: Schadstoffemissionen eines Fahrzeuges mit Ottomotor und Direkteinspritzung im MVEG-Test

Figure 4: Emissions of a gasoline DI vehicle in the MVEG test

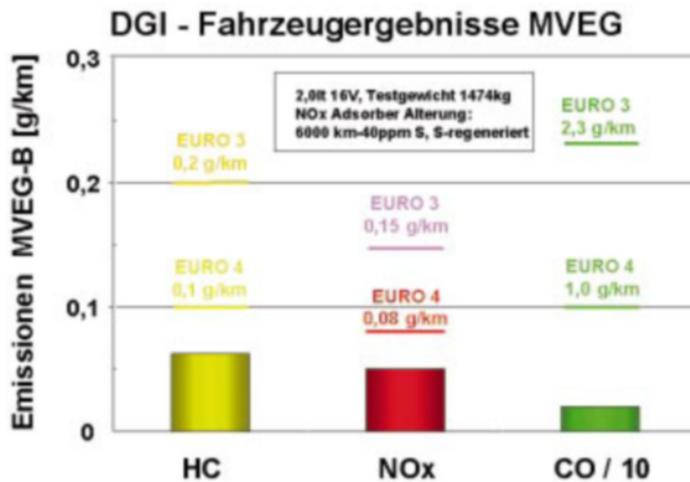


Bild 5: Kurzfristig umsetzbare Verbesserungspotentiale der Ottomotor-Direkteinspritzung.

Figure 5: Short-term improvement potential for direct injection technology.

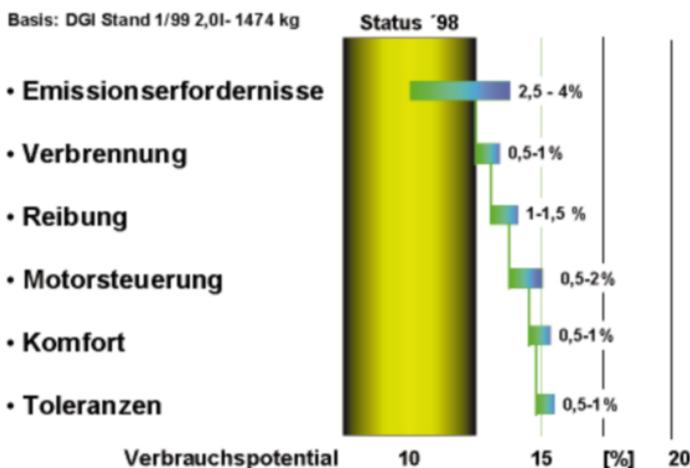
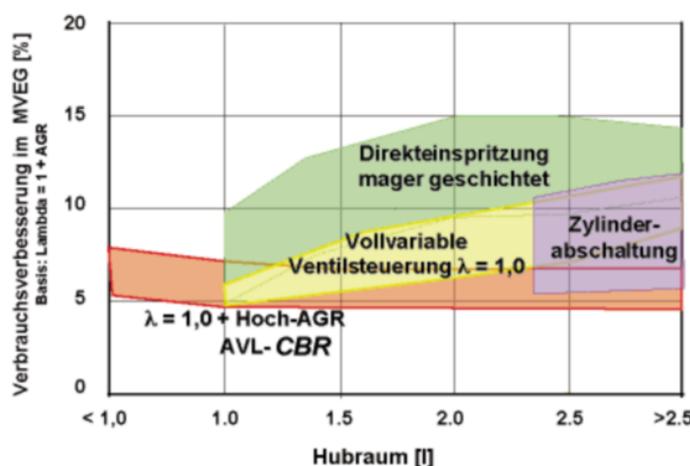


Bild 6: Kurzfristig realisierbare Verbrauchspotentiale verschiedener Einzeltechniken

Figure 6: Short-term availability of fuel economy from individual technologies.



Daher ist die Kombination verschiedener Maßnahmen ein naheliegender Ansatz. Die Effizienz solcher Technikkombinationen wird jedoch dadurch begrenzt, dass die Verbrauchsabsenkung vielfach über gleiche physikalische Wirkmechanismen erfolgt. Dadurch addiert sich bei der Kombination solcher Techniken zwar deren Mehrauf-

wand in vollem, deren Nutzeffekt jedoch nur in geringerem Ausmaß. Da sich zudem die Systemkomplexität erhöht, ist neben einer genauen Kosten/Nutzen-Analyse auch eine detaillierte Risikoabschätzung zur Systembewertung erforderlich. Leider trifft diese Tatsache insbesondere für Techniken mit besonders hohem Einzelpotential zu.

Bei der Kombination vom Schichtbetrieb mittels Direkteinspritzung und der verlustarmen Laststeuerung über eine vollvariable Ventilsteuerung beispielsweise kann ein Großteil des jeweiligen Verbesserungspotentials, nämlich die Verringerung der Ladungswechselverluste, nur einfach genutzt werden.

Besonders attraktiv hingegen sind Systemkombinationen, bei denen bestimmte Synergieeffekte erst in der Verbindung von Einzeltechniken nutzbar werden. So kann beispielsweise durch Direkteinspritzung und Schichtbetrieb das dynamische Ansprechverhalten von Downsizingkonzepten mit Turboaufladung entscheidend verbessert werden. Durch den nahezu ungedrosselten Teillastbetrieb ergeben sich deutlich höhere Turboladerdrehzahlen in der Teillast und damit ein rascherer Hochlauf des Turboladers in Beschleunigungsphasen. Zusätzlich kann durch den Luftüberschuss in der Teillast mittels Zweiteinspritzung während der Auslassphase in wenigen Einzelzyklen des Lastsprungs hohe Zusatzenergie zur Turbine gebracht werden und damit Laderhochlauf und dynamisches Ansprechverhalten weiter verbessert werden.

Damit kann die Fahrbarkeit von Downsizingkonzepten mit manuellem oder automatisiertem Schaltgetriebe deutlich verbessert werden. Auch in Kombination mit CVT oder konventioneller Automatik profitiert das Anfahr- und Lastwechselverhalten.

Bei Variation der effektiven Verdichtung über spätes Schließen der Einlassventile begrenzt das Rückschieben von flüssigem Kraftstoff und daraus resultierende Kraftstoff-Fehlverteilung die mögliche Variationsbreite bei Saugrohreinspritzung. Dieses Problem kann durch Direkteinspritzung entscheidend verringert werden. Dadurch stellt sich die Technikkombination von Direkteinspritzung mit Turboaufladung und variabler effektiver Verdichtung besonders attraktiv dar.

Gewisse Funktionskombinationen sind bereits innerhalb der Einzeltechniken vorgegeben. Vollvariable Ventilsteuerungen umfassen von der Veränderung des Ventilhubverlaufes bis hin zur Ventilabschaltung bereits umfangreiche Möglichkeiten zur Variation der Ladungsbewegung. Zusätzlich lässt sich bei der vollvariablen Ventilsteuerung die effektive Verdichtung über den Schließzeitpunkt der Einlassventile anpassen.

9 Mehrkostenbewertung

Die Bewertung verschiedener Techniken und deren Kombinationen ist in hohem Maße von der jeweils betrachteten Fahrzeugkategorie abhängig. Die Wirksamkeit vieler verbrauchsverbessernder Maßnahmen wird stark von der Motorlast beeinflusst und wird damit durch Fahrzeug- und Motorgröße sowie die Antriebsstrangauslegung und das daraus resultierende Lastkollektiv bestimmt. Dadurch ergeben sich zwischen den einzelnen Fahrzeugklassen teilweise ausgeprägte Differenzierungen der relativen und insbesondere der absoluten Kraftstoffverbrauchs-Ersparnis.

Hingegen sind die für die Einzeltechniken aufzuwendenden Zusatzkosten abgesehen von Zylinderzahl und -anordnung nur in geringem Maße von der Motorgröße abhängig und haben damit für verschiedene Fahrzeugklassen deutlich unterschiedliche Anteile an den Gesamtkosten.

Eine absolute Bewertung von Verbrauchsmaßnahmen in EURO-Zusatzkosten/l Kraftstoffverbrauchs-Verringerung (beziehungsweise EURO/g CO₂-Absenkung) verstärkt die klassenspezifische Differenzierung durch den unterschiedlichen Basisverbrauch der einzelnen Fahrzeugklassen. Für die Darstellung eines CO₂-Flottenwertes mit minimierten Gesamtmehrkosten erweist sich eine solche Bewertung als sinnvollster Ansatz.

Dabei ergeben sich durch die unterschiedliche Marktverträglichkeit von Mehrkosten in den einzelnen Fahrzeugkategorien zusätzliche Einschränkungen.

10 Fahrzeugklassenspezifische Konzepte

Zur Abschätzung der Verbrauchseinsparung wurde überwiegend auf Messdaten von Prototypfahrzeugen zurückgegriffen. Für noch nicht als abgestimmtes Gesamtfahrzeug verfügbare Technikkombinationen wurden entsprechend bewertete Kennfeldhochrechnungen herangezogen. Die Systemmehrkosten wurden auf einer für alle Techniken und Fahrzeugklassen identischen Stückzahlbasis errechnet.

Erwartungsgemäß zeigt sich in allen Fahrzeugklassen, dass mit zunehmender Verbrauchsabsenkung der dafür einzusetzende Aufwand überproportional steigt. Sind Kraftstoffverbrauchsreduzierungen bis zu

10 % gegenüber einem derzeitigen Basisstand ($\lambda = 1 + \text{AGR}$) noch mit spezifischen Mehrkosten von deutlich unter 200 EURO/l Minderverbrauch darstellbar, erfordern darüber hinausgehende Verbrauchsabsenkungen teilweise deutlich höhere spezifische Mehrkosten. Im Folgenden werden Mehrkosten und zu favorisierende Techniken für drei charakteristische Hubraumklassen betrachtet.

10.1 Hubraumklasse kleiner 1,4 l

Diese Fahrzeugklasse wird durch Drei- und Vierzylindermotoren und ein vergleichsweise hohes Leistungsgewicht trotz geringem absoluten Fahrzeuggewicht beschrieben. Dadurch liegt das Lastkollektiv eher bei höheren Lasten. Der Absolutverbrauch ist neben der verbrauchsgünstigen Lage des Lastkollektivs in Bereichen niedriger spezifischer Kraftstoffverbrauchs vorwiegend aufgrund des niedrigen Fahrzeuggewichtes gering. Für mögliche Verbrauchsabsenkungen ergeben sich dadurch vergleichsweise hohe relative Mehrkosten, **Bild 7**.

Nur die Technik der variablen Ladungsbewegung mit Hoch-AGR (zum Beispiel AVL-CBR [1]) bietet ein attraktives Verhältnis der Mehrkosten zur Verbrauchsabsenkung.

Die für verbrauchssenkende Techniken vielfach erforderliche Zusatzenergie (elektrische und mechanische Antriebsleistung bei Hochdruck-Direkteinspritzung sowie elektromechanischer variabler Ventilsteuerung) verringert sich nicht linear mit dem Hubvolumen und schmälert damit das Verbesserungspotential bei kleinen Hubräumen. Damit sind sowohl variable Ventilsteuerung als auch Direkteinspritzung hinsichtlich des Kosten/Nutzen-Verhältnisses als reine Verbrauchskonzepte in dieser Fahrzeugklasse nicht attraktiv. Zudem sind hohe Systemmehrkosten gerade bei kleinen Fahrzeugen schwer durchsetzbar.

Ähnliches gilt auch für die meisten Technikkombinationen. Als sinnvoll erweist sich nur die Kombination einer variablen Ladungsbewegung inklusive Hoch-AGR entweder mit einem Phasenschieber-Einlass oder einem automatisierten Schaltgetriebe.

10.2 Hubraumklasse von 1,4 bis 2,4 l (vier Zylinder)

Diese Hubraumklasse ist einerseits durch die höchsten Produktionsstückzahlen, andererseits aber auch durch die technischen

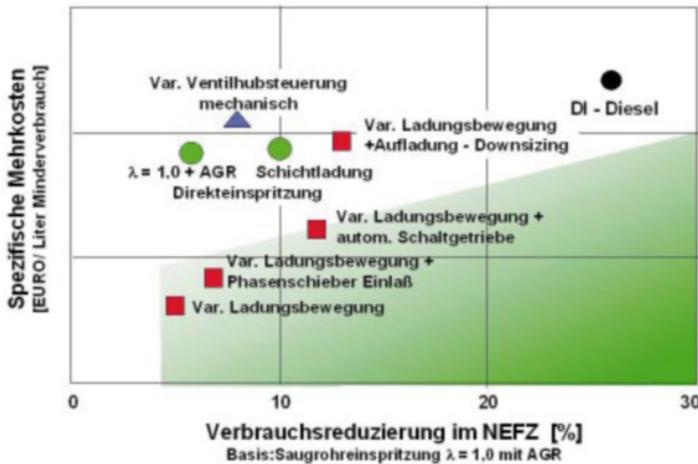


Bild 7: Spezifische Mehrkosten für Verbrauchsabsenkung - Hubraumklasse kleiner 1,4 l

Figure 7: Specific additional costs for fuel economy improvement - engine displacement < 1.4 l

Randbedingungen höchst attraktiv für den Einsatz verbrauchsreduzierender Maßnahmen. Durch das bei niedrigeren Lasten liegende Lastkollektiv und den höheren Absolutverbrauch ergeben sich für die meisten Techniken ausgeprägtere Verbrauchsreduzierungen, **Bild 8**, aber nur unwesentlich höhere Systemmehrkosten als bei den kleineren Fahrzeugen. Dadurch weisen verbrauchsreduzierende Maßnahmen besonders im oberen Hubraumbereich dieser Fahrzeugklasse hohe Kosteneffizienz auf.

Neben der für moderate Verbrauchsverbesserungen äußerst vorteilhaften Technik der variablen Ladungsbewegung ist hier vor allem die Direkteinspritzung (Schichtladekonzept) für größere Verbrauchsabsenkungen attraktiv. Die mechanisch variable Ventilsteuerung (ohne die Funktionalität Zylinderabschaltung) liegt zwar bezüglich der relativen Systemmehrkosten auf ähnlichem Niveau wie die Direkteinspritzung, bietet jedoch geringere Verbrauchsverbesserungen. Ähnliche Verbrauchsreduzierungen wie mit variabler Ventilsteuerung können aber auch durch geschickte Kombinati-

on variabler Ladungsbewegung mit einem Phasenschieber an der Einlassnockenwelle (später Einlassschluss) mit deutlich geringeren Zusatzkosten dargestellt werden.

Insbesondere bei Motoren mit breitem Drehzahlbereich gewinnt jedoch die variable Ventilsteuerung an Attraktivität, da die größeren Freiheiten bei der Ventilhubgestaltung verstärkt in Volllastvorteile umgesetzt werden können.

Die elektromechanische Ventilsteuerung erfordert durch den hohen elektrischen Leistungsbedarf die Kombination mit einem Kurbelwellen-Starter-Generatorsystem. Je nach Auslegung dieses Systems ergeben sich unterschiedliche Verbesserungspotentiale und Systemmehrkosten, so dass sich diese Technik derzeit nur vergleichsweise grob einschätzen lässt.

Auf Basis des Downsizing mittels Abgasturboaufladung erscheinen Technikkombinationen sowohl mit variabler Ladungsbewegung als auch mit Direkteinspritzung sinnvoll, liegen aber sowohl in Hinblick auf er-

zielbare Verbrauchsabsenkungen als auch der erforderlichen Zusatzkosten auf hohem Niveau.

10.3 Hubraumklasse größer 2,0 l und mehr als vier Zylinder

Während das Hubvolumen die Wirksamkeit der Einzelmaßnahmen wesentlich, deren Zusatzkosten hingegen nur gering beeinflusst, weisen Zylinderanzahl und -anordnung ein umgekehrtes Verhalten auf. Die mit größerer Zylinderanzahl und V-Anordnungen zumeist höheren Zusatzaufwendungen für Verbrauchstechniken wirken sich durch die in dieser Hubraumklasse üblichen grösseren Zylinderzahlen deutlicher aus.

Durch das in dieser Klasse zumeist niedrige Leistungsgewicht ergibt sich eine Verschiebung des Lastkollektives zu niedrigeren Lasten, was durch den höheren Anteil an Automaten nur zum Teil kompensiert wird. Damit ergeben sich ausgeprägte Verbesserungspotentiale für Techniken, welche eine Verringerung der Drosselverluste bewirken, **Bild 9**.

Bei der Direkteinspritzung kann das niedrige Lastkollektiv von hochmotorisierten Varianten dann zu Einschränkungen des Verbrauchspotentials führen, wenn eine erhöhte Teildrosselung eingesetzt werden muss, um zur Abgasnachbehandlung erforderliche minimale Abgastemperaturen einzuhalten. Dieser Effekt wird jedoch teilweise dadurch wieder kompensiert, dass gleichzeitig die durch die derzeitige Abgasnachbehandlung gegebene Begrenzung des Schichtbetriebes zu hohen Lasten hinweniger wirksam wird.

Da die vollvariable Ventilsteuerung hier kaum Einschränkungen hinsichtlich der Abgasnachbehandlung aufweist, kann sie in dieser Hubraumklasse nahezu das Verbrauchspotential der Direkteinspritzung erreichen. Zusatzpotential ist auch durch die Möglichkeit der Zylinderabschaltung gegeben.

Die Technikkombination der Direkteinspritzung mit Turboaufladung in einem



Bild 8: Spezifische Mehrkosten für Verbrauchsabsenkung - Hubraumklasse 1,4-l bis 2,4-l- Vierzylindermotoren

Figure 8: Specific additional costs for fuel economy improvement - engine displacement 1.4 - 2.4 l

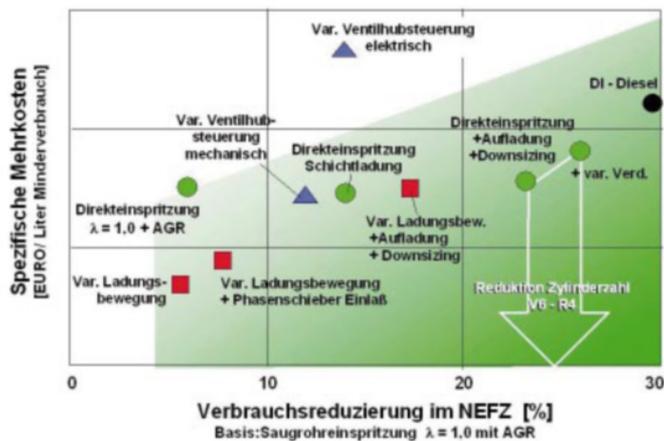


Bild 9: Spezifische Mehrkosten für Verbrauchsabsenkung - Hubraumklasse über 2 l, mehr als vier Zylinder

Figure 9: Specific additional costs for fuel economy improvement - engine displacement > 2 l, more than 4 cylinders

Downsizing-Konzept, gegebenenfalls ergänzt um eine variable effektive Verdichtung, bietet auch in dieser Hubraumklasse das maximale Verbrauchspotential und liegt auch hinsichtlich der Mehrkosten in einem vertretbaren Rahmen. Konkurrenzlos günstig wird jedoch ein solches Downsizingkonzept dann, wenn die Hubraumverringerung gleichzeitig mit einer Reduzierung der Zylinderanzahl (V6/R6 zu R4/R5, V8 zu V6) einhergeht. So sind beispielsweise durch Ersatz eines V6-Motors durch einen hubraumkleineren, aufgeladenen Motor mit Direkteinspritzung Verbrauchsverbesserungen von über 25 % bei gleichzeitig deutlich besserer Drehmomentcharakteristik kostenneutral darstellbar. Dabei bleibt jedoch individuell zu bewerten, inwieweit der Image- und Komfortverlust der niedrigeren Zylinderzahl ausreichende Kundenakzeptanz findet.

II Schlussfolgerungen

Auch unter der Schadstoffnorm EU 4 stehen für den Ottomotor eine große Zahl von Techniken zur Verbrauchsabsenkung bereit. Die breite Serieneinführung von höchst effizienten Magerkonzepten mit De-NO_x-Adsorber-Technik ist nach heutigem Stand der Technik auf eine weitgehende Entschwefelung des Kraftstoffes angewie-

sen, die über die bereits gefassten Beschlüsse der EU-Kommission noch deutlich hinausgehen sollte.

Die Auswahl der einzusetzenden Technik wird intensiv von den auf die Verbrauchsreduzierung bezogenen Mehrkosten bestimmt. Gerade diese Betrachtung führt zu dem Schluss, dass insbesondere im untersten Hubraumbereich einfache und heute bereits unmittelbar einsetzbare Techniken wie homogene Hoch-AGR-Konzepte mit variabler Ladungsbewegung die beste Wahl darstellen.

In der mittleren Hubraumklasse wird die Direkteinspritzung in Zukunft eine wesentliche Rolle spielen, da sie nicht nur schon heute die höchste Verbrauchsverbesserung aller Einzelmaßnahmen darstellt, sondern darüber hinaus auch das größte Potential für weitere Verbesserungen aufweist. Als Alternativkonzept mit einem niedrigeren Einsatzrisiko durch die Verwendung konventioneller Abgasnachbehandlung, aber auch geringerem Verbrauchspotential stellt die mechanische vollvariable Ventilsteuerung dar. Mit einem zumindest für kurzfristigen Großserieneinsatz hohen Technikrisiko muss die elektromechanische variable Ventilsteuerung bewertet werden. Ihre extrem hohen Freiheitsgrade machen sie jedoch langfristig für Ni-

schenanwendungen interessant. Für weitere Potentialsteigerungen sind Technikkombination der Direkteinspritzung mit Aufladung, Downsizing und teilvariablem Ventiltrieb zur Verdichtungsvariation besonders attraktiv. Betrachtet man den oberen Hubraumbereich, so ergeben sich weitere Alternativen wie die Zylinderabschaltung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass verbesserte Motortechniken in hohem Maße zur Reduktion des Flottenverbrauchs und damit der CO₂-Emission beitragen können, allerdings auch nicht unerhebliche Mehraufwendungen erfordern werden.

Literaturhinweise

- [1] Schamschulla, S.; Bauder, T.: Variable Ladungsbewegung durch Einlaßkanal-Abschaltung, Ladungswechsoptimierung an 4-Takt-Motoren, Vortrag, Haus der Technik, Essen 1996
- [2] Krämer, M.; Thom, W.; Kühn, M.; Baier, K.: Variable Ventilsteuerungen - ein Weg zur Verbrauchsreduzierung und Drehmomentsteigerung bei Otto Motoren. Vortrag, 20. Int. Wiener Motorensymposium, 1999
- [3] Klütting, M.; Flierl, R.; Unger, H.: Drosselfreie Laststeuerung - ein Motorkonzept zur Erfüllung zukünftiger Anforderungen. Vortrag, 20. Int. Wiener Motorensymposium, 1999
- [4] Koch, A.; Kramer, W.; Warneke, V.: Die Systemkomponenten eines elektromechanischen Ventiltriebs. Vortrag, 20. Int. Wiener Motorensymposium, 1999
- [5] Pischinger, S.; Salber, W.: Möglichkeiten zur Verbesserung des Kaltstart-, Warmlauf- und Instationärverhaltens mittels variabler Ventilsteuerzeiten. Vortrag, 20. Int. Wiener Motorensymposium, 1999
- [6] Fraidl, G. K.; Piock, W. F.; Holy, G.; Unger, E. M.; Wirth, M.: Otto-Direkteinspritzung - das Verbrauchskonzept für EU IV. Vortrag, 20. Int. Wiener Motorensymposium, 1999
- [7] Mayerhofer, U.; Fraidl, G. K.; Piock, W. F.; Wirth, M.: Konzept eines aufgeladenen DI-Ottomotors. Vortrag, Stuttgarter Symposium, 24.-25.2.1999



You can read the English version of this article in **MTZ worldwide**.

Subscription Hotline:
++49 / 6 11 / 78 78 151

Besuchen Sie uns im Internet:

<http://www.atz-mtz.de>