# Potenziale von Schaltsaugrohren zur $CO_2$-Reduktion in der Teillast

Veröffentlicht in: MTZ extra, Juni 2016.
Springer Fachmedien Wiesbaden.

Leadership in Filtration

MANN+HUMMEL

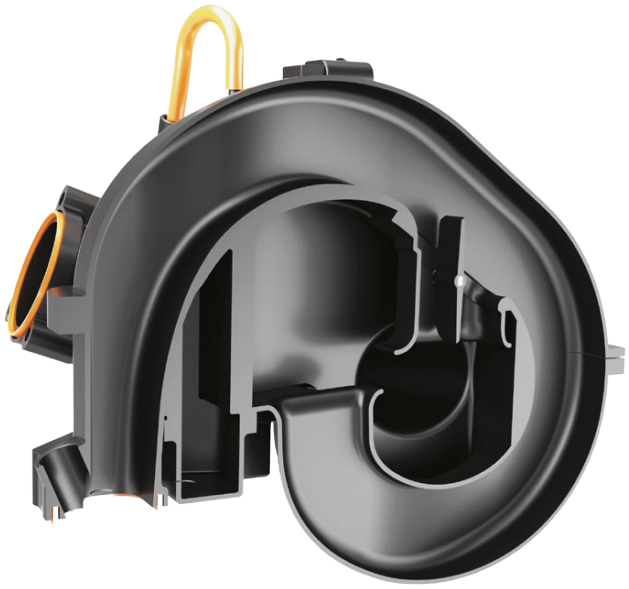
Autoren
›› Heinz Bühl ist Vice President Intake Manifolds bei MANN+HUMMEL
›› Matthias Kratzsch, Fachbereichsleiter Ottomotorenentwicklung bei der IAV GmbH in Berlin.
›› Michael Günther, Abteilungsleiter Verbrennung/Thermodynamik Ottomotoren bei der IAV GmbH in Chemnitz
›› Herbert Pietrowski, Senior Product Engineer Intake Manifolds bei MANN+HUMMEL

Seit Einführung der Turboaufladung ist die Anwendung von Schaltsaugrohren zur Leistungssteigerung zurückgegangen. Zusätzlich zur Beeinflussung der Volllastkennlinie bieten aktive Saugrohre jedoch Vorteile im Teillastbetrieb. MANN+HUMMEL und IAV haben die Kraftstoffverbrauchspotenziale von Schaltsaugrohren an zwei aktuellen Ottomotorkonzepten im NEFZ untersucht.

## Optimierung im gesamten Motorkennfeld

Vor dem Hintergrund der Klimaveränderung plant die EU-Kommission, bis 2020 den maximalen $CO_2$-Ausstoß im Flottenmittel auf 95 g $CO_2$/km zu begrenzen. Die $CO_2$-Reduktion kann dabei sowohl am Verbrennungsmotor als auch durch Hybridisierung beziehungsweise durch einen Elektroantrieb erfolgen. Werden diese Ziele nicht erreicht, plant die EU-Kommission ab 2019 eine Strafe von 95 Euro pro Gramm $CO_2$-Überschreitung für jedes verkaufte Fahrzeug. Die damit verbundenen erheblichen Kostenbelastungen für die Hersteller erhöhen den Druck zur Reduzierung des $CO_2$-Ausstoßes.

Schaltsauganlagen werden typischerweise zur Verbesserung an der Volllast und teilweise zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs im klopfbegrenzten Teillastbereich genutzt [1, 2]. Bei konsequenter Auslegung eines aktiven Saugrohrs kann darüber hinaus der Wirkungsgrad in zyklusrelevanten Kennfeldbereichen verbessert werden. Die Optimierung muss dafür im gesamten Motorkennfeld erfolgen. Dabei sind Kenngrößen wie der Luftaufwand und die Wärmeeinträge an langen Saugarmen unter Beachtung von Klopfphänomenen zu berücksichtigen. Auch muss die Entdrosselungswirkung über Saugarmlänge unter Beachtung der Effekte der zugehörigen Steuerzeiten auf Restgasanteil und Restgasverträglichkeit in die Überlegungen einbezogen werden. Das komplexe Zusammenspiel mehrerer gleichzeitig wirkender Auslegungskriterien stellt daher hohe Anforderungen an die Optimierungsmethodik.



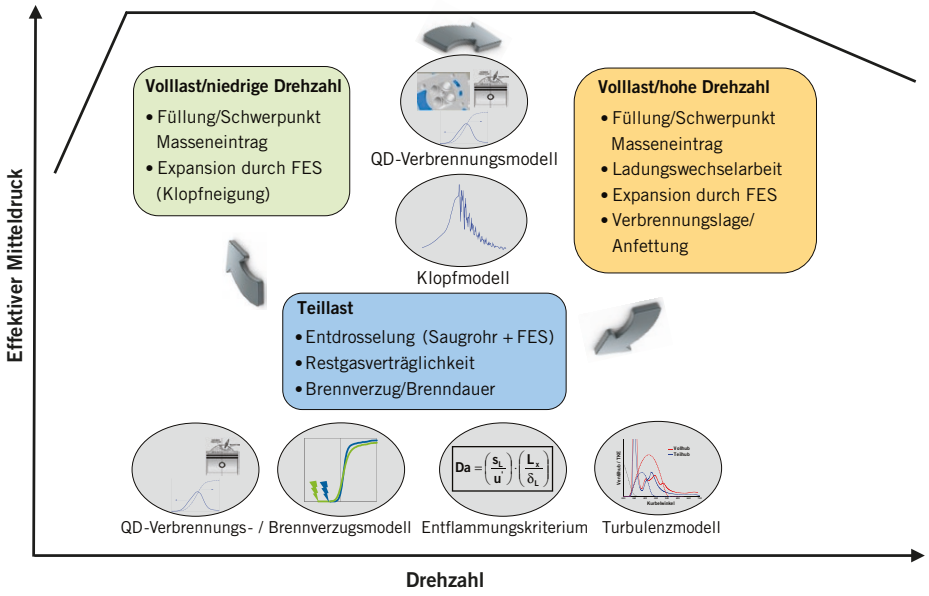



BILD 1: Simulationsansätze und Auslegungsstrategie im Motorkennfeld (qualitative Darstellung)
(© MANN+HUMMEL)

## Methodik zur Ladungswechseloptimierung

Die Bewertung von Potenzialen einer kombinierten Auslegung von Saugrohrgeometrie und Ventilsteuerzeiten in Teil- und Volllast erfordert einen erweiterten Simulationsansatz. Die notwendigen Modellansätze sind direkt den thermodynamischen Effekten in verschiedenen Kennfeldbereichen zugeordnet, BILD 1.

Die ladungstemperatur- und turbulenzreduzierende Wirkung eines frühen Einlass-Schließens (FES) wird mit einem präzise abgestimmten quasidimensionalen (QD-)Verbrennungsmodell abgebildet. Damit können neben geänderten motorischen Betriebsbedingungen auch Veränderungen im Ladungsbewegungs- und Turbulenzniveau bei einer kombinierten Saugarm- und Steuerzeitenauslegung effizient bewertet werden. Die reduzierte Entflammbarkeit, die unter anderem eine Folge niedrigerer Temperatur im Zylinder zum Zündzeitpunkt ist, wird mit einem Ansatz auf Basis der Damköhler-Zahl ermittelt. Zur Bewertung von Änderungen der Klopfneigung, zum Beispiel durch Änderungen des Wärmeeintrags in Abhängigkeit der Saugarmlänge sowie des Expansionseffekts bei FES, dient ein erweiterter Arrhenius-Ansatz.

Die Optimierung auf niedrigsten Kraftstoffverbrauch bei Teillast erfolgt an 17 stationären Kennfeldpunkten, die sich aus der Häufigkeitsverteilung der Motor-Fahrzeug-Kombination im NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) ergeben. Abzüglich Schub- und Start-Stopp-Phasen ergeben sich 15 relevante Drehzahl-Mitteldruck-Paarungen für die Saugrohroptimierung. Das Gesamtergebnis ermittelt sich dabei aus den stationären Verbräuchen der Lastpunkte sowie den entsprechenden Verweilzeiten. Zur Auslegung von Saugrohrgeometrie und Steuerzeiten ergibt sich eine sehr große Anzahl möglicher Parameterkombinationen im Motorkennfeld, die mit ersatzmodellgestützten, stochastischen Verfahren optimiert werden.

## Verbrauchsoptimale Auslegung Schaltsaugrohr

Die Grundlage der Teillastauslegung ist analog zur Volllast die drehzahlabhängige Ausnutzung der Druckwellendynamik, allerdings nicht zur Füllungssteigerung, sondern zur Anhebung des Saugrohrdrucks. Genutzt wird in diesem Fall die zum Einlass-Schluss (ES) eintreffende Unterdruckwelle, die zur Rückströmung von Frischgas aus dem Brennraum führt, BILD 2 (rechts). Zum Erreichen der gewünschten Füllung im Zylinder muss der Saugrohrdruck entsprechend erhöht werden, wobei gleichzeitig der Schwerpunkt des Gasmasseneintrags früher erreicht wird. Beide Effekte bewirken eine Entdrosselung und steigern die Effizienz des Motors.

BILD 2 (links) zeigt ein Vergleichskennfeld zwischen dem Basissaugrohr und einem für eine diskrete Drehzahl

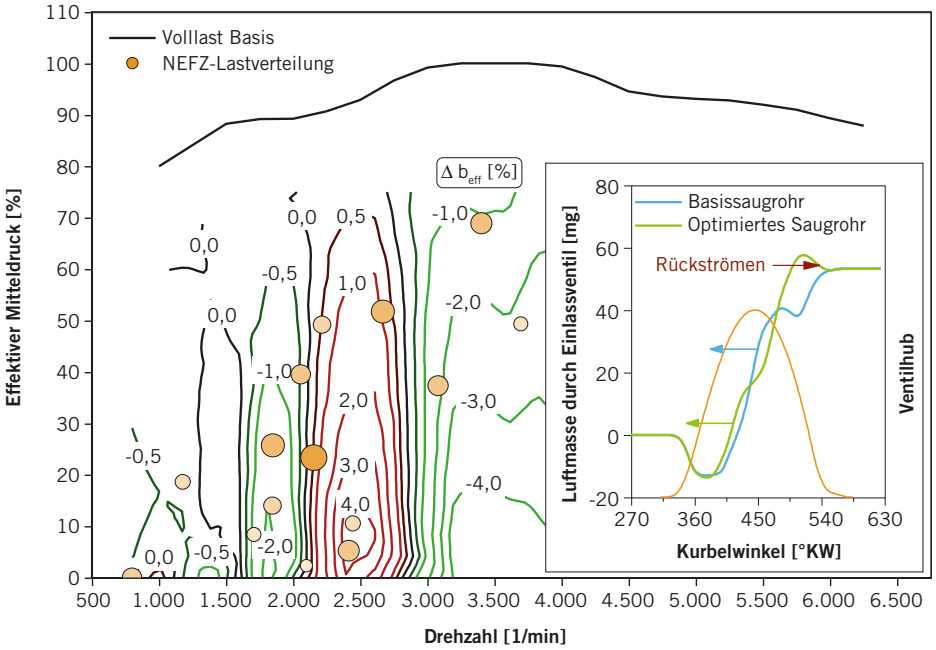



BILD 2: Verbrauchspotenziale einer optimierten Saugarmlänge (© MANN+HUMMEL)

teillast-optimierten Saugrohr. Es wird deutlich, dass zum Erschließen des gesamten

Potenzials verschiedene Längen kombiniert werden müssen. Die für Schaltsaugrohre typische Verbesserung der Volllastkurve kann damit zusätzlich zur Teillastoptimierung genutzt werden, wenn die erreichte Überleistung zur Verkürzung des Einlassnockens genutzt wird. Der dabei einsetzende FES-Effekt [3] reduziert den Kraftstoffverbrauch in der Teillast weiter. Die Rückwirkung des Einlass-Schlusses auf die Saugrohrauslegung für den Betriebspunkt 2.000/min und 2 bar zeigt BILD 3 (links). Das Erreichen des jeweiligen Verbrauchsoptimums erfordert eine Kombination aus optimierter Saugarmlänge und verkürzter Steuerbreite. Wie BILD 3 (rechts) zeigt, hat jede Nockenverkürzung, ausgehend von einem Einlass-Schluss im UT, einen positiven Verbrauchseffekt.

## Potenziale am Saugmotor

Die Potenziale zur Kraftstoffeinsparung im NEFZ wurden exemplarisch an einem Dreizylinder-Saugmotor mit Kanaleinspritzung in einem Kleinstwagen bewertet. Ziel der Optimierung war eine Verbrauchsreduktion bei möglichst unveränderter Volllast durch Auswahl geeigneter Saugarmlängen in Kombination mit dem Einlassnocken. Der beste Kompromiss stellte sich bei einer Leistungslänge von 300 mm und einer Drehmomentlänge von 530 mm mit einer Verkürzung des Einlassnocken-Öffnungswinkels um 24 °KW ein. Mit der ermittelten Konfiguration konnte eine Kraftstoffeinsparung von 0,9 % im NEFZ erreicht werden, was einer $CO_2$-Einsparung von 1 g/km entspricht, BILD 4 (rechts). In kundenrelevanten Konstantfahrpunkten wurden über 2 % und in einzelnen Betriebspunkten bis zu 4 % Einsparpotenzial erreicht. In den Drehzahlbereichen um 1.500 und 2.400/min ergeben sind nur Potenziale aus der Steuerbreitenanpassung, da sich dort bereits mit der Basislänge eine optimale Wellendynamik einstellt, BILD 4 (links).

Für die Teillastoptimierung wird unterhalb von 1.500/min und zwischen 2.000 und 2.900/min die Drehmomentlänge, in allen anderen Punkten die Leistungslänge genutzt. Bei Volllastanforderung wird bis zum Erreichen von 4.500/min die Drehmomentlänge genutzt, darüber die Leistungslänge. Im klopfbegrenzten Teillastbereich wird, wo möglich, die kurze Länge verwendet. Mit der gewählten Auslegung wurden trotz deutlicher Nockenverkürzung die Volllastkennwerte beibehalten. Das rein mit Schaltsaugrohr erreichbare Verbrauchspotenzial ohne Verkürzung des Einlassnocken-Öffnungswinkels beträgt 0,6 %.

## Potenziale am Turbomotor

Die Untersuchungen am Turbomotor wurden an einem Vierzylinder-Konzept mit Direkteinspritzung in einem Kompaktklasse-Fahrzeug durchgeführt. Das Saugrohr wurde auch am Turbomotor bezüglich der Wellendynamik hinsichtlich minimaler Ladungswechselverluste optimiert. Abweichend zur Saugmotorauslegung wurde jedoch die drehmomentsteigernde Wirkung einer Saugarmverlängerung im unteren Drehzahlbereich (Low-end-Torque, LET) für eine Verkürzung der Einlasssteuerbreite genutzt.

Die Optimierung des Gesamtsystems aus Schaltsaugrohr und Einlass-Steuer-breite ergab beim gewählten Konzept eine Verbrauchsreduktion im NEFZ von 0,8 %, was einer Verringerung der $CO_2$-Emission um 1 g/km entspricht, BILD 5. Erreicht wurde das mit Längen von 70 und 475 mm in Kombination mit einer Verkürzung des Einlassnocken-Öffnungswinkels um 19 °KW. Dabei wird die große Länge entlang der Volllast bis zum Erreichen des Nennmoments bei 1.500/min sowie in den gekennzeichneten Niedriglastbereichen verwendet. In allen anderen Betriebspunkten werden die kurzen Saugarme genutzt.

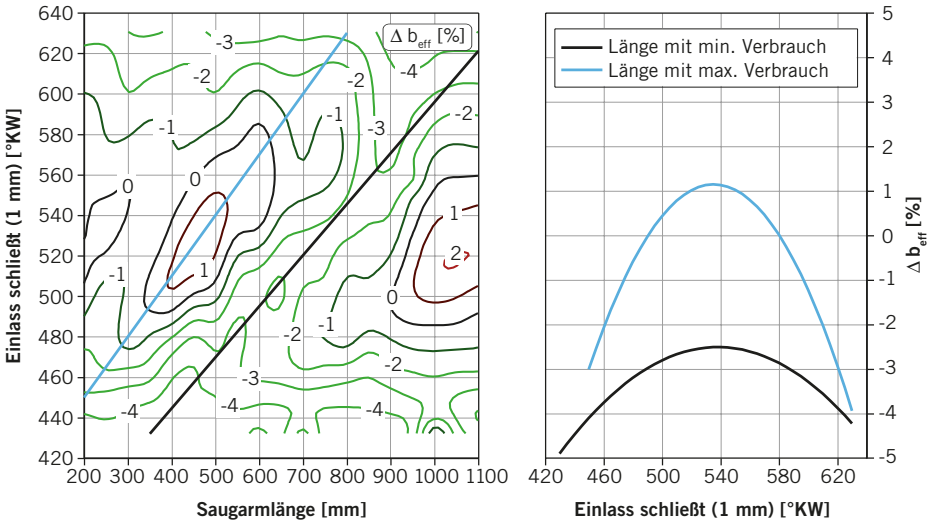



BILD 3: Wirkung von Saugarmlänge und Einlass-Schluss-Zeitpunkt (n = 2.000/min; $p_{me}$ = 2 bar) (© MANN+HUMMEL)

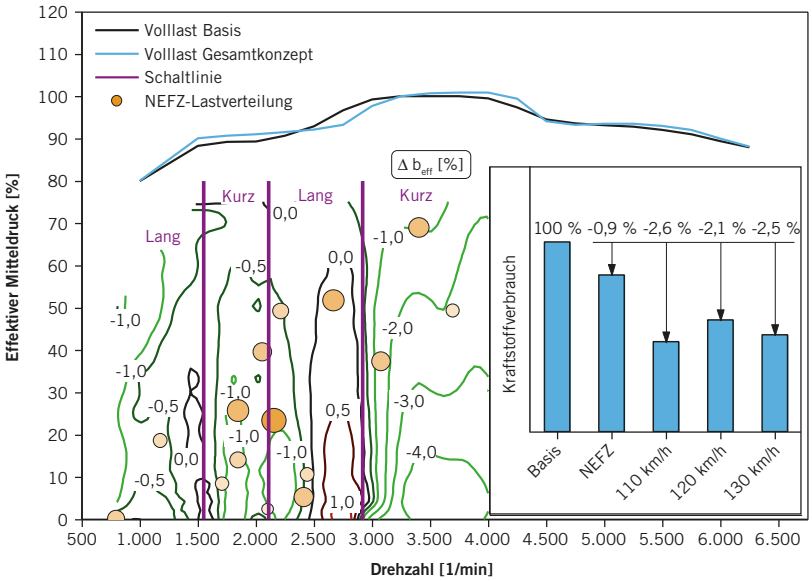



BILD 4: Verbrauchsreduktion am Dreizylinder-Saugmotor (© MANN+HUMMEL)

Neben dem NEFZ-Potenzial zeigte sich durch die Verkürzung des Einlassnocken-Öffnungswinkels darüber hinaus eine positive Wirkung bei hoher Last. Durch die Nutzung des Miller-Effekts kann die Ladungstemperatur im Zylinder und somit die Klopfneigung reduziert werden. Die resultierende frühere Verbrennungslage führt zu einem reduzierten Anfettungsbedarf. Neben den damit erreichten Verbrauchseinsparungen an der Volllast bis zu 6 %, BILD 5 (rechts), ist das ein weiterer Schritt zur Realisierung von λ = 1 an der Volllast und Einhaltung von Emissionsgrenzen bei kundentypischen Streckenprofilen (real driving emissions).

## Konstruktive Ausführung des Saugrohrs

Diese Saugrohrapplikation kann auf die bereits bekannte und langjährig bewährte Technik der Schaltsaugrohre mit Längenschaltung aufsetzen. Grundlage der Untersuchung ist das Prinzip des „Zuschalters“, wobei der kurze Leistungskanal dem längeren Drehmomentkanal zugeschaltet wird. Aus den verfügbaren Komponenten wie Klappen und Drehschiebern wurden zur Minimierung von Totvolumina (Querschnittserweiterung des Drehmomentkanals an der Y-Verzweigung bei geschlossener Klappe) Schaltklappen gewählt. Dabei muss, je nach Anforderungen hinsichtlich Klap-penform und -größe, die Leckage durch gezielt eingebrachte Anlageflächen und/oder durch zusätzliche Gummierung auf ein akzeptables Niveau reduziert werden, BILD 6.

Eine wesentliche Herausforderung dieser Applikation liegt in der Funktion des Antriebs. Abweichend von der bisher üblichen last- und drehzahlabhängigen Umschaltung steigt durch eine kennfeldgesteuerte Funktion die Anzahl der Schaltbewegungen erheblich – es ist von einer achtfachen Schalthäufigkeit auszugehen. Bei diesem reinen Öffnen und Schließen ohne Zwischenstellungen kommt ein kostengünstiger Vakuumsteller als Antrieb zur Anwendung. Dabei ist zu beachten, dass die Auslegung der Komponenten, vor allem die der Membrane, den erhöhten Anforderungen Rechnung trägt. Zur Überwachung der Schaltfunktion kann eine berührungslose Positionserkennung in den Vakuumsteller integriert werden. Bei fehlender oder nicht ausreichender Unterdruckversorgung ist alternativ ein elektrischer Steller einsetzbar.

Der beschriebene Lösungsansatz mit bauraumoptimierter Integration des Lagesensors in den Vakuumstellerdeckel und durchgehender gekröpfter Klappenwelle sowie rotativen Anschlägen auf der Klappenwelle ist

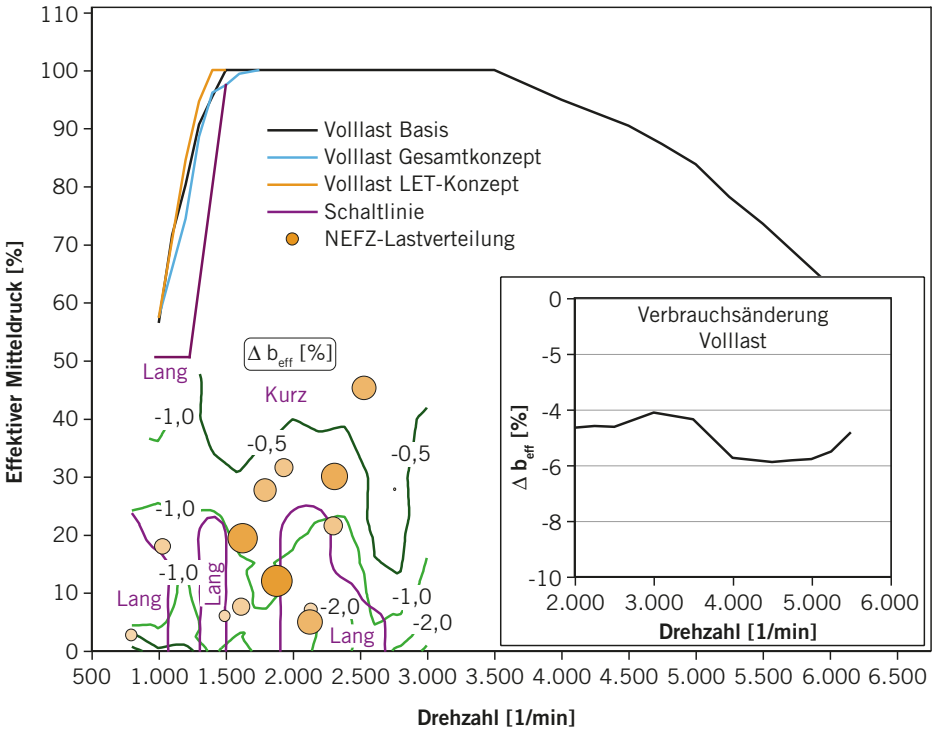



BILD 5: Verbrauchsreduktion am Vierzylinder-Turbomotor (© MANN+HUMMEL)

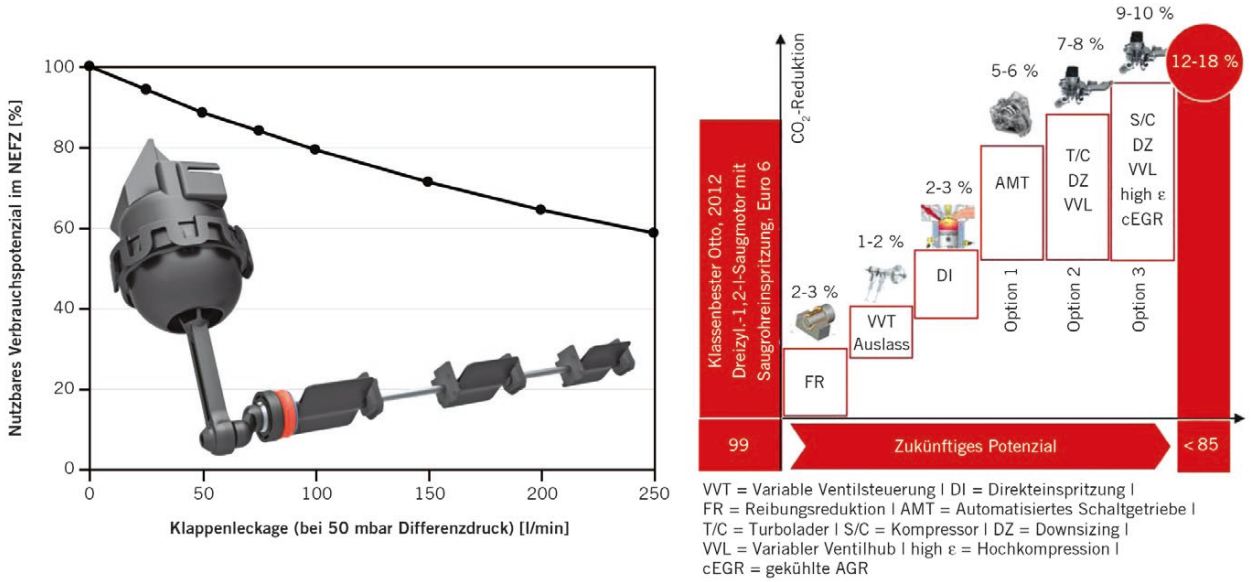



BILD 6: Einfluss Klappenleckage auf Verbrauchspotenzial und Vergleich zu alternativen Lösungsansätzen (englisches Original in [4], hier in freier deutscher Übersetzung) (© MANN+HUMMEL)

OBD-2-(On-Board Diagnose)-konform. Der Sensorkennlinie werden Bereiche für Funktion, Fehlfunktion und Diagnose zugewiesen.

Für diese neue Saugrohrapplikation kann auf langjährig bewährte Technik als Basis zurückgegriffen werden. Lösungen für die erweiterte Funktionalität hinsichtlich Schalthäufigkeit und OBD-2-Fähigkeit sind im Hause MANN+HUMMEL vorhanden.

Die Darstellung in BILD 6 (rechts) verdeutlicht den Aufwand zur Reduktion der $CO_2$-Emissionen. Mit relativ komplexen Lösungen wie variablen Ventilsteuerzeiten (1 bis 2 %) oder Direkteinspritzung (2 bis 3 %) werden nur geringe Wirkungsgradsteigerungen bei vergleichsweise hohem Kostenaufwand erreicht. Im Vergleich zu den in [4] beschriebenen alternativen Ansätzen zur $CO_2$-Reduktion ist der Aufwand zur Realisierung eines Schaltsaugrohrs als gering einzustufen. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs um circa 1 % mit diesem Lösungsansatz kann demzufolge positiv bewertet werden.

## Zusammenfassung

Der gewählte Konzeptansatz für Schaltsaugrohre reduziert den Kraftstoffverbrauch und die $CO_2$-Emissionen im kundenrelevanten Kennfeldbereich. Das Potenzial ist konzeptabhängig und beträgt etwa 1 g $CO_2$/km im NEFZ. Erreicht wird dies durch die konsequente Nutzung des an der Volllast vorhandenen Drehmomentpotenzials zur Verbrauchsreduktion in der Teillast. Zur Definition von verbrauchssenkenden Saugrohren ist jedoch ein neuer Gesamtansatz zur Konzeptauslegung notwendig. In der Simulation sind dafür erweiterte Modellansätze erforderlich, um sowohl Ladungswechsel- als auch Verbrennungseffekte abbilden zu können. Zur Erschließung des Potenzials sind moderne Schaltsaugrohre, ausgelegt auf eine hohe Anzahl von Schaltspielen, erforderlich. MANN+HUMMEL verfügt über die benötigte Technologie mit geringer Klappenleckage und kann auf im Feld bewährte Komponenten zurückgreifen. Die Reduzierung des $CO_2$-Ausstoßes wird damit mit vergleichsweise geringer Kostenerhöhung möglich.

Literaturhinweise

1 Kuhn, M.: Effiziente Ansaugsysteme – dargestellt am Beispiel des neuen Audi-2,0-l-5V-Motors. HdT-Tagung Ansaugsysteme, Essen, 2001

2 Jahrens, H.-U.; Krebs, R.; Lieske, S.; Middendorf, H.; Breuer, M.; Wedowski, S.: Untersuchungen zum Saugrohreinfluss auf die Klopfbegrenzung eines Ottomotors. 10. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2001

3 Kirsten, K.; Brands, C.; Kratzsch, M.; Günther, M.: Selektive Umschaltung des Ventilhubs beim Ottomotor. In: MTZ 73 (2012), Nr. 11, S. 834-839

4 Denner, V.: Zukunft gestalten – Innovationen für effiziente Mobilität. 34. Internationales Wiener Motorensymposium, 2013

# Bei unseren Bauteilen schreiben wir „besonders klein" besonders groß.

**KOMPAKT, EFFIZIENT, FLEXIBEL.**

Unsere Luftfiltersysteme sind für optimale Leistung auf kleinstem Raum ausgelegt. Intelligente Druckverlustoptimierung, erstklassige Akustik und besondere Servicefreundlichkeit machen sie zum echten Leistungsträger. Klar, dass wir derartige technische Innovationen für die globalen Märkte auch international entwickeln.

**www.mann-hummel.com**

Leadership in Filtration

MANN+HUMMEL