



Sonderdruck/Offprint

aus/from MTZ 12/2010
Springer Automotive Media
Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

SEKUNDÄRLUFT-EINBLASUNG – EIN BESTANDTEIL VERBRAUCHSARMER NIEDRIGEMISSIONSKONZEPTE

**SECONDARY AIR INJECTION –
A COMPONENT OF LOW-CONSUMPTION,
LOW-EMISSION STRATEGIES**

**AUTOREN****DR.-ING. HOLGER PAFFRATH**

ist Abteilungsleiter in der Produktentwicklung der Business Unit Automotive Emission Systems der Pierburg GmbH in Neuss.

**DIPL.-ING. STEFAN PANHANS**

ist verantwortlich für elektromotorische Aktuatoren im Antriebsstrang bei der Audi AG in Ingolstadt.

WACHSENDE BEDEUTUNG

Die Sekundärlufteinblasung ist ein zentraler Schlüssel zur Erfüllung der umfassenden Anforderungen verbrauchsarmer Ottomotorkonzepte hinsichtlich niedriger Kaltstartemissionen, hoher Robustheit und Langlebigkeit des Emissionssystems. Schon heute ist sie eine bekannte Größe und fester Bestandteil vieler Anwendungen. Zur Erreichung der genannten Ziele wird sie allerdings zukünftig noch an Bedeutung gewinnen. Die Wichtigkeit der Sekundärlufteinblasung wird außerdem unterstützt durch den SULEV/PZEV-Bestandteil einer 15-jährigen Dauerhaltbarkeitsforderung in Bezug auf das Emissionssystem. Hierdurch ergeben sich weitere hohe Herausforderungen an die Langlebigkeit und Diagnosefähigkeit der Komponenten. Durch Markt und Gesetzgebung wird außerdem die Forderung nach Senkung der CO₂-Emissionen immer lauter. Konzepte zur Verbrauchsreduzierung bei

Verbrennungsmotoren, beispielsweise durch Downsizing, finden im Zuge dieser Entwicklung einen vermehrten Marktzugang und lassen ihrerseits den Einsatz der Sekundärlufteinblasung sinnvoll erscheinen.

FUNKTIONSWEISE

Die Sekundärlufteinblasung ist primär ein Mittel zur Reduzierung von Emissionen nach einem Kaltstart und zur Beschleunigung des Katalysatoraufheizens bei Ottomotoren. Dazu wird bei fettem Motorbetrieb Luft in einer kurzen Phase (zirka 20 bis 60 s) nach dem Kaltstart direkt in das Abgassystem eingeblasen. Dabei liegt dann im Abgasstrang ein mageres Gemisch vor. Der Kerngedanke der Sekundärlufteinblasung ist es, unverbrannte Kraftstoffbestandteile im Abgastrakt nachzuverbrennen. Der englische Terminus „Exhaust Gas Ignition“ (EGI) ist besonders bezeichnend für diese Funktionsweise.

SEKUNDÄRLUFTEINBLASUNG – EIN BESTANDTEIL VERBRAUCHSARMER NIEDRIGEMISSIONSKONZEPTE

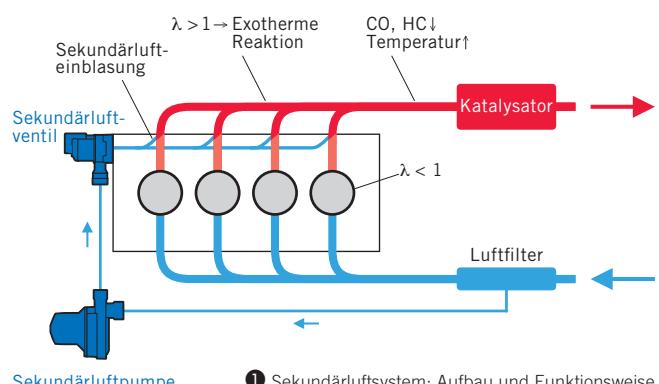
Die neuen Emissionsstufen Euro 6 in Europa und SULEV/PZEV in den USA stellen hohe Anforderungen an die Güte der Verbrennung und die Qualität des Abgasnachbehandlungssystems von Automobilmotoren. Da die meisten heutigen Systeme im betriebswarmen Zustand sehr gute Emissionsergebnisse erzielen, stellen die Reduzierung der Emissionen nach dem Kaltstart und das schnelle Aufheizen des Abgasnachbehandlungssystems die größten Herausforderungen dar. Der vorliegende Beitrag von Pierburg und Audi führt aus, wie Sekundärluft dieses Ziel und weitere Aspekte unterstützt.

Der Motor wird während des Kaltstarts innermotorisch fett betrieben und man erhält infolge dessen einen ruhigen, stabilen und aussetzerfreien Motorlauf bei relativ niedriger Leerlaufdrehzahl. Eine Begleiterscheinung des fetten Motorbetriebs ist die Emission von Bestandteilen einer unvollständigen Verbrennung, insbesondere Kohlenmonoxid CO und Kohlenwasserstoffe HC. Ohne Sekundärluft würden diese in die Umwelt emittiert. Mit Hilfe der Sekundärlufteinblasung werden sie zu einem sehr großen Anteil bereits im Abgaskrümmer stromauf des Katalysators in einer exothermen Reaktion oxidiert, wodurch zum einen die Masse der CO- und HC-Emissionen deutlich reduziert wird, und zum anderen die Katalysatoreintrittstemperatur steigt und der Katalysator schneller seine Betriebstemperatur erreicht, ①.

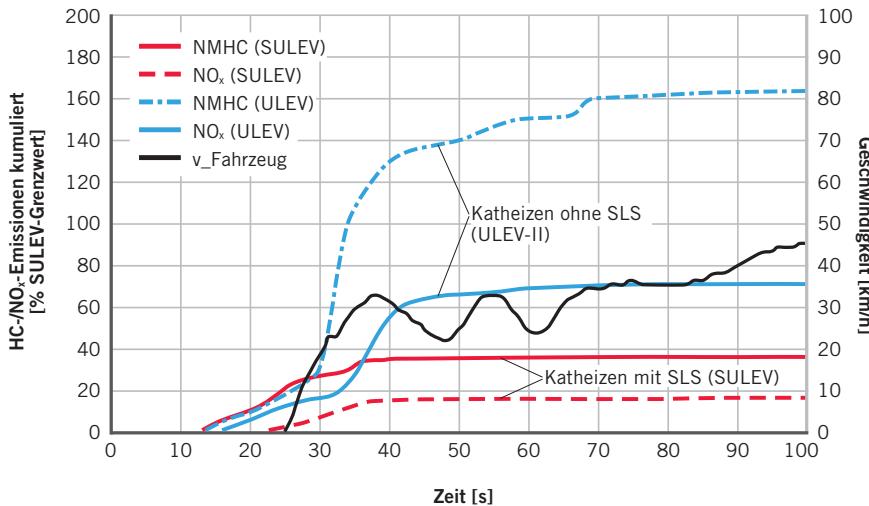
Trotz der erhöhten CO- und HC-Konzentrationen im Brennraum bei fettem

Motorbetrieb sind die Emissionen infolge der Nachverbrennung mit Sekundärluft im Abgaskrümmer niedriger als bei magerem Verbrennung ohne Sekundärlufteinblasung [3]. In [2] ist durch Vergleich zweier Ausführungen eines Motors exemplarisch gezeigt worden, dass Sekundärlufteinblasung eine Katalysatorheizstrategie erlaubt,

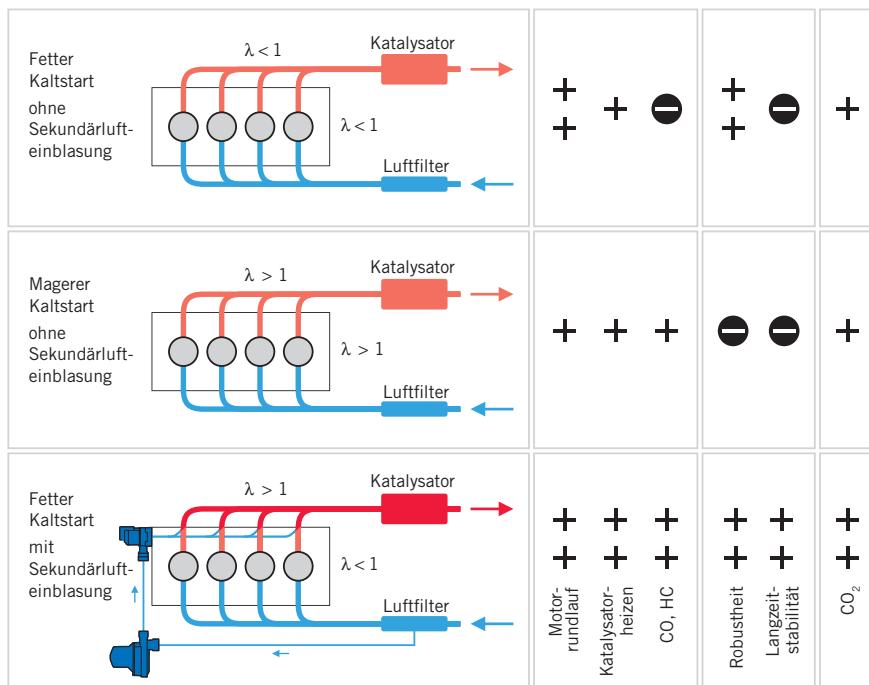
die 20 s nach Teststart eine um 80 °C höhere Katalysatoreintrittstemperatur erzielt. Die kumulierte HC-Emission zum Zeitpunkt 45 s nach Teststart ist für die Variante mit Sekundärluft 60 % geringer als für die Variante ohne Sekundärlufteinblasung, ②. Das schnelle Aufheizen des Katalysators erlaubt einen frühen Über-



① Sekundärluftsystem: Aufbau und Funktionsweise



② Kumulierter Emissionsverlauf im FTP-75-Abgastest [2]



③ Vergleich verschiedener Kaltstart- und Katheizstrategien

gang in den geregelten Katalysatorbetrieb. Das Ergebnis ist eine signifikante Reduzierung der NO_x-Emission, die nicht direkt der exothermen Reaktion der Sekundärlufteinblasung zuzuschreiben ist, sondern als Folge der schnellen Kat-Aufheizung eintritt. Der Großteil der NO_x-Emissionsreduzierung erfolgt zu einem Zeitpunkt, an dem die Sekundärlufteinblasung bereits wieder deaktiviert ist, ②.

Typische Werte für das motorinterne Luftverhältnis während der Sekundärluftbetriebsphase sind Lambda zwischen 0,7

und 0,9. In allen Anwendungen wird Sekundärluft kontinuierlich eingeblasen. Eine an die Frequenz des Ladungswechsels angepasste gepulste Einblasung bringt keine Vorteile [3]. Die Luftförderleistung der Sekundärluftpumpe (SLP) wird nicht in Abhängigkeit des Motorbetriebspunkts geregelt. Das Luftverhältnis im Abgassystem stellt sich als Ergebnis der ungeregelten Lufteinblasung und des innermotorischen Luftverhältnisses. Das abgasseitige Luftverhältnis ist zeitlich und örtlich nicht konstant. Im Mittel beträgt es 1,2 bis 1,4. In

den meisten Anwendungen erfolgt die Lufteinblasung parallel in alle Auslasskanäle. Dabei ist die Reaktivität des Abgases höher, je näher der Sekundärlufteinblasort am Auslassventil liegt.

Neben den oben genannten primären und in der Vergangenheit nahezu ausschließlich betrachteten Vorteilen der Sekundärlufteinblasung treten heute neue Aspekte zusätzlich in den Vordergrund, ③. Die Sekundärlufteinblasung wird zunehmend in Betracht gezogen, um mit ihrer Hilfe verbrauchsarme Konzepte zu realisieren. Auch die Tatsache, dass Emissionsvorteile durch Sekundärluft keiner Alterung unterliegen, und die ausgezeichnete Robustheit des Gesamtsystems machen die Technik für weitere Anwendungen interessant. Der CO₂-Vorteil durch Sekundärluft stammt nicht aus den Betriebsphasen des Sekundärluftsystems selbst. Der Vorteil entsteht indirekt dadurch, dass mit dem Einsatz eines Sekundärluftsystems Motorkonzepte und Katalysatoranordnungen gewählt werden können, die während der gesamten Motorbetriebsdauer vorteilhaft für den Kraftstoffverbrauch sind.

Ein Beispiel ist die Platzierung des Katalysators. Zur schnellen Aufheizung wird dieser häufig motornah angeordnet. Dadurch entsteht der Bedarf zur Katalysatorkühlung durch Anfettung, was verbrauchsschädlich ist. Gerade bei zunehmend auf den Markt drängenden kleinvolumigen Motoren, die häufig bei hohen Lasten betrieben werden, kann sich das nachteilig auf den Kraftstoffverbrauch auswirken. Das Potenzial der zusätzlichen Exothermie durch Sekundärlufteinblasung kann genutzt werden, um einen motorfern angeordneten Katalysator schnell genug aufzuheizen. Durch diese Anordnung entfällt der verbrauchsschädliche Bedarf an Katalysatorschutz durch Anfettung.

Ein weiteres Beispiel ist die Kompensation der durch den Turbolader verursachten Wärmesenke. Turboaufgeladene Motoren müssen den Wärmeverlust in der Turbine kompensieren, um den Katalysator stromab der Turbine schnell genug aufzuheizen. Die Exothermie der Sekundärluft kann das leisten und ist damit eine Möglichkeit, verbrauchsarme Konzepte wie Turbo-Ottomotoren mit Direkteinspritzung zu ermöglichen.

Die Robustheit von Systemen, die auf Sekundärlufteinblasung aufbauen, zeigt sich unter anderem durch das relativ weite Lambdafenster, in dem der Motor nach

dem Kaltstart betrieben werden kann. Strategien ohne Sekundärluft mit magerem Motorstart haben ein engeres Fenster und leiden mehr unter Veränderungen von beispielsweise Umgebungsbedingungen, Kraftstoffqualität oder Bauteiltoleranz. Darüber hinaus sind Emissionsvorteile durch Sekundärluft frei von Alterung. Anders als Katalysatoren, die beispielsweise thermisch oder chemisch altern, liefert die Sekundärluft einen über die Lebensdauer konstanten Beitrag zur Emissionsminderung.

SYSTEMAUFBAU UND ANFORDERUNGEN AN KOMPONENTEN

Kernbestandteile eines modernen Sekundärluftsystems sind eine Sekundärluftpumpe (SLP) und ein Sekundärluftventil, ①. Die SLP entnimmt die Luft typischerweise über eine Leitung dem Motorluftfilter oder alternativ einem eigenen Sekundärluftfilter. Sie fördert die Luft durch eine Lufteleitung zum Sekundärluftventil. Das Ventil öffnet entweder den Luftpfad für die Sekundärluft oder sperrt den Luftpfad

ab, um das Rückströmen von Abgas in das Sekundärluftsystem zu verhindern. Ebenso wie die Pumpe, die ungeregelt mit konstanter Spannung betrieben wird, wird das Ventil nicht im Hub geregelt, um Einfluss auf die Sekundärluftmenge zu nehmen. Stromab des Ventils wird die Sekundärluft in das Abgassystem geleitet, vorzugsweise durch eine Luftverteilungsbohrung und Stichkanäle im Zylinderkopf. Ergänzt werden einige Systeme durch Sensorik, Drucksensor oder Luftmassenstromsensor, allein zum Zwecke der Diagnose.

Sekundärluftsysteme werden so seit dem Ende der 1980er Jahre eingesetzt. Der grundsätzliche Aufbau hat sich, abgesehen von der Sensorik, nicht geändert. Die Anforderungen an das System und die Komponenten unterlagen jedoch einer stetigen Anpassung an die Rahmenbedingungen. Lagen Betriebszeiten in der Vergangenheit zwischen 60 und 90 s, so werden für zukünftige Anwendungen weniger als 20 s angestrebt. Typische Abgasgegendschüsse für das Sekundärluftsystem waren etwa 100 mbar. Durch Turbolader und Abgasnachbehandlungskomponenten steigt der Betriebsdruck Richtung 140 mbar und höher. Mit dem vermehrten Einsatz von biogenen Kraftstoffen müssen die Materialien der Komponenten angepasst werden. Nicht zuletzt den Bedürfnissen und Anforderungen der On-Board-Diagnose (OBD) geschuldet verändern sich die Systeme in der Komponentenauswahl, den Betriebsmodi sowie durch das Hinzufügen von Sensoren. Anforderungen an die Sekundärluftpumpe sind unter anderem eine kurze Hochlaufzeit (Zeit bis zum Erreichen von 90 % des nominalen Förderpunkts), eine kompakte Bauweise, eine hohe Luftförderung bei hohem Betriebsdruck und eine geringe Luft- und Körperschallabmission. War die Zeit bis zum Erreichen des nominalen Förderpunkts in der Vergangenheit kein so ausschlaggebendes Kriterium, so hat sich das mit der immer kürzer werdenden Betriebszeit geändert. Je kürzer die Einschaltzeit desto wichtiger wird es, schnell die nominale Fördermenge zu erreichen.

VERGLEICH MIT ELEKTRISCH BEHEIZBAREM KATALYSATOR

Ein schnelles Aufheizen des Katalysators auf seine Betriebstemperatur lässt sich theoretisch auch mit einem elektrisch beheizbaren Katalysator erzielen. Der Vorteil

dieses Konzepts liegt in der Möglichkeit einer sehr schnellen Aufheizung des Katalysators. Möchte man dieses Potenzial voll ausnutzen, ist die Bereitstellung sehr großer elektrischer Leistungsdichten erforderlich. Da deren Darstellung mit einem herkömmlichen 12-V-Fahrzeugbordnetz nicht möglich ist, muss der elektrisch beheizbare Katalysator über ein entkoppeltes Teilbordnetz mit einer höheren Spannung betrieben werden. Dieses besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten: elektronischer Leistungsschalter, Zusatzbatterie, DC/DC-Wandler, Leistungssteuergerät und Hochvoltverkabelung. Ein weiterer Vorteil des elektrisch beheizbaren Katalysators ist die Möglichkeit, die Katalysatoraufheizung bereits vor dem Motorkaltstart, beispielsweise über das Zündungssignal (Klemme 15), zu starten. Dagegen ist der frühest mögliche sinnvolle Einschaltzeitpunkt der Sekundärluftpumpe der Moment des Startereinspuren, wobei die exotherme Reaktion naturgemäß erst leicht verzögert, nach der ersten Zündung, beginnen kann.

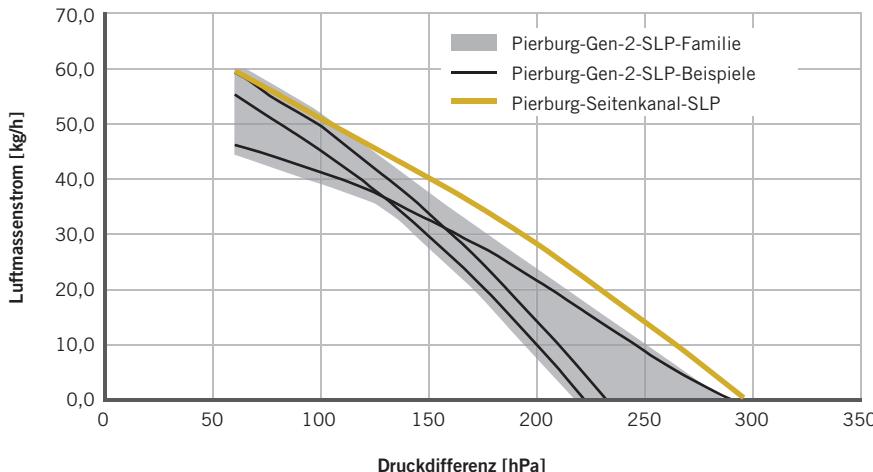
Alle oben genannten Komponenten des E-Kat-Systems, einschließlich des elektrischen Katalysators selbst, müssen als OBD-pflichtige Bauteile diagnostiziert werden und über Lebensdauer eine gleichbleibende Leistung sicherstellen. Der technische Aufwand hierfür ist aufgrund der hohen Komplexität des elektrisch beheizbaren Katalysators gegenüber einem Sekundärluftsystem ungleich höher. Die große Robustheit eines Sekundärluftsystems wird nicht erreicht werden können. Ein weiterer Nachteil des elektrisch beheizbaren Katalysators ergibt sich im dauernden Kurzstreckenbetrieb. Hier kann eine negative Ladungsbilanz eine schrittweise Entladung der Batterie mit jedem Motorkaltstart zur Folge haben. Sollte dieser Fall eintreten, muss schließlich die Katalysatorheizung deaktiviert werden. Das führt zu OBD-Problemen und muss über eine Warnlampe angezeigt werden. Die Sekundärluftpumpe belastet mit ihrer vergleichsweise niedrigen Leistungsaufnahme die Batterieladung nicht, weil ihr Energiebedarf vollständig vom Generator abgedeckt werden kann. Betrachtet man letztlich noch die Systemkosten, die bei einem elektrisch beheizbaren Katalysator, allein schon wegen der Aufwendungen für die entkoppelte Spannungsversorgung, das Mehrfache eines Sekundärluftsystems



④ Die neue Seitenkanal-Sekundärluftpumpe von Pierburg



⑤ Luftströmung in der neuen Seitenkanal-Sekundärluftpumpe



6 Luftdurchsatzcharakteristik ausgewählter SLP von Pierburg



7 Größenvergleich zwischen der SLP der zweiten Generation von Pierburg und der neuen Seitenkanal-SLP

betrachten, dann überwiegen die Vorteile der Sekundärluftpumpe eindeutig. Der Ersatz durch einen elektrisch beheizbaren Katalysator erscheint aus heutiger technischer Sicht als nicht sinnvoll.

SEITENKANAL-SEKUNDÄRLUFTPUMPE

Die Pierburg GmbH hat eine neue Sekundärluftpumpe entwickelt, die den zunehmend anspruchsvollen Anforderungen gerecht wird, ④. Anders als die bekannten Pumpen der SLP-Baureihe der zweiten Generation von Pierburg mit zweistufigem Radialgebläse [1], fördert die neue SLP die Luft mittels eines einstufigen Seitenkanalgebläses parallel mit je einem Kanal auf beiden Seiten des Laufrads, ④ und ⑤. Das Laufrad wird durch einen Gleichstrommotor angetrieben, der direkt mit dem Pumpengehäuse verschraubt ist. Durch unterschiedliche Gehäuse- und Deckelvarianten und durch verschiedene Motorauslegungen kann die neue SLP flexibel und schnell

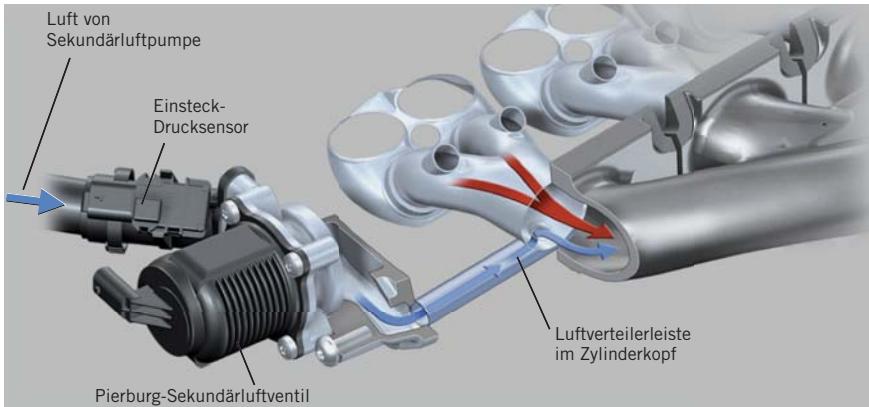
an Kundenanforderungen adaptiert werden. Die neue Pumpe vereint ein sehr hohes Luftfördervolumen mit gleichzeitig geringem Bauraumbedarf. Bei niedrigen Betriebsdrücken (zirka 100 mbar) liegen die ersten ausgeführten Varianten der Seitenkanal-SLP bereits am oberen Ende dessen, was auch durch die SLP der zweiten Generation abgedeckt wird, ④. Bei höheren Betriebsdrücken (zirka 140 mbar) übertrifft die im Bauraum deutlich kleinere Seitenkanal-SLP die größeren Pumpen der Baureihe der zweiten Generation von Pierburg, ⑦, und des Wettbewerbs. Durch Optimierung von Trägheitsmoment und Motorcharakteristik konnte die Hochlaufzeit im Vergleich zur bisherigen Pierburg-SLP um bis zu 75 % reduziert werden und liegt für die neue Seitenkanal-SLP von Pierburg bei nur noch 300 ms.

Eine große Herausforderung bestand darin, die exzellenten akustischen Eigenchaften der SLP der zweiten Generation von Pierburg mit Radialgebläse beizubehalten oder sogar zu verbessern. Durch

minimale Unwucht von Motor und Laufrad bildet der Läufer der Pierburg-Seitenkanal-SLP eine ideale Grundlage für geringen Körperschall. Durch die Gestaltung der SLP mit Schwerpunktslage in der Anschraubebene der Schwingungsdämpfer und durch die gezielte Auswahl der Schwingungsdämpfergeometrie wird der in die Motor- oder Fahrzeugstruktur eingeleitete Körperschall weiter gesenkt. Die SLP ist dadurch für motor- und fahrzeugfeste Anbau geeignet. Der Luftschall, eine oftmals unangenehme Eigenschaft von Seitenkanalgebläsen, konnte durch gezielte Anpassung der Kanalkontur und des Laufrads soweit optimiert werden, dass der Summenpegel der Pierburg-Seitenkanalpumpe besser als der von Wettbewerbsprodukten und sogar geringfügig besser als der der SLP der zweiten Generation von Pierburg ist. Weiterhin konnte der bei Seitenkanalgebläsen oft prägnante Ton der ersten Schaufelordnung unterbunden werden.

SEKUNDÄRLUFTVENTILE

Die bewährten Pierburg-Sekundärluftventile der Typen ARV (Betätigung durch Unterdruck mit Ansteuerung unabhängig von Pumpe) oder SLV (Betätigung durch Pumpendruck ohne separate Ansteuerung) erfüllen nach wie vor die Anforderungen vieler Applikationen. In neuen Anwendungen wird dennoch vermehrt ein 2007 erstmals in Serie eingeführtes Pierburg-Ventil mit elektromagnetischer Betätigung (Typ ESV) vorgesehen, ⑧. Die Hauptvorteile dieses Typs sind das schnelle Öffnen und Schließen des Ventils unabhängig von Unterdruck, Pumpendruck oder Umgebungsdruck, die hohe Öffnungskraft und der geringe Bauraumbedarf. Das ESV teilt sich mit den beiden anderen Typen ARV und SLV das Konzept des Ventilschließkörpers mit integriertem automatischen Ventil, um ungewolltes Rückströmen von Abgas in die Sekundärluftleitung zu verhindern. Das herausragende Merkmal des Pierburg-ESV ist die sehr hohe Öffnungskraft von zirka 80 N trotz des geringen Bauraums für die Spule des Magneten. Erreicht wird dieser Vorteil durch einen geteilten Anker. Dieser ermöglicht bei geschlossenem Ventil eine hohe Fokussierung der Magnetfeldlinien und einen geringen Abstand der wirk samen Pole.



8 Installationsbeispiel eines Pierburg-ESV mit Einstech-Drucksensor [2]



9 Pierburg-ESV mit integriertem Drucksensor

Alle Sekundärluftsysteme und deren Komponenten von Pierburg unterstützen OBD-Konzepte mit Luftmassenstromsensoren oder Drucksensoren. Für OBD-Konzepte, die auf Basis der Messung des Drucks im Sekundärluftsystem arbeiten, bietet Pierburg zwei Optionen. Zum einen die Variante eines Einstechdrucksensors, ⑧, der viel Flexibilität bei der Auswahl und Platzierung des Sensors ermöglicht. Zum anderen bietet Pierburg die Möglichkeit eines in den Aktuator integrierten Drucksensors, ⑨. Dadurch sinkt der Bauraumbedarf und es entfällt die Notwendigkeit einer separaten elektrischen Kontaktierung. Der integrierte Sensor ist ein Absolutdrucksensor mit einem ratiometrischen, analogen Ausgangssignal. Die Kennlinie ist programmierbar. Bei beiden Varianten, das heißt bei der mit internem Sensor und der mit Einsteksensor, ist der Aktuator und damit auch der elektrische Stecker in 90°-Schritten gegenüber dem Gehäuse drehbar. In der Variante mit integriertem Sensor ermöglicht dies ein Ringkanal, der in jeder der vier Einbaulagen das Drucksignal vom Gehäuse in den Aktuator weiterleitet. Der geringe Bauraumbedarf, der modulare Aufbau und die austauschbaren

Anschlüsse erlauben einen Platz sparenden und druckverlustarmen Direktanbau an den Zylinderkopf.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Sekundärlufteinblasung hat sich als robuste, langlebige und im Fahrzeuggesamtsystem kostengünstige Variante zur Emissionsreduzierung bewiesen. Ihr Potenzial, verbrauchsarme Konzepte zu unterstützen, wird sie zunehmend wieder in den Fokus rücken. Die Weiterentwicklung der Produkte muss mit den gewandelten Anforderungen Schritt halten. Die neue Pierburg-SLP und die Ventilweiterentwicklung unterstützen den Einsatz von Sekundärlufteinblasung in vielfältigen Anwendungen. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung der Faktoren, bei denen die Sekundärlufteinblasung ihre Vorteile zeigt, wird sie in Zukunft vermehrt eingesetzt werden. Dies gilt insbesondere für SULEV-Anwendungen. Alternative Konzepte mit ähnlicher Zielrichtung, etwa HC-Fallen oder elektrisch beheizte Katalysatoren, adressieren einzelne dieser Aspekte, wirken jedoch nicht so ganzheitlich wie die Sekundärlufteinblasung.

AUSBlick

Doch nicht nur beim Ottomotor bieten sich Sekundärluftsysteme zur Emissionsminde rung an. Auch bei Dieselmotoren könnte die zusätzliche Frischluft im Abgasstrang die Oxidation von Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid und das Emissionsverhalten insgesamt verbessern. Untersuchungen von Pierburg haben ergeben, dass sich mit Sekundärluft auch die Dieselausbau temperatur deutlich steigern lässt. Eine andere Studie belegt zudem, dass eine Anhebung der mittleren Abgastemperatur um 20 bis 30 °C die CO-Konvertierungsrate im Gesamtzyklus um bis zu 70 % erhöht [4].

LITERATURHINWEISE

- [1] Kochs, M. W.; Kloda, M.; van de Venne, G.; Golden, J.: Innovative Secondary Air Injection Systems. SAE-Paper 2001-01-0658, 2001
- [2] Eiglmeier, C.; Pfalzgraf, B.; Helbig, J.; Adam, S.; Grigo, M.; Dornhöfer, R.: Der neue R4 – 2.0 I TFSI SULEV/PZEV-Motor von Audi. 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motoren technik, 2007
- [3] Halgren, B. E.; Heywood, J. B.: Effects of Substantial Spark Retard on SI Engine Combustion and Hydrocarbon Emissions. SAE-Paper 2003-01-3237, 2003
- [4] Neumann, D.; Schrade, F.; Basse, N.; Schäffner, J.; Tschiggfrei, W.; Krämer, L.: Kohlenmonoxid – Die neue Emissionsherausforderung für Diesel-Pkw. In MTZ 70 (2009) Nr. 7/8

SECONDARY AIR INJECTION – A COMPONENT OF LOW-CONSUMPTION, LOW-EMISSION STRATEGIES

The new emission stages, Euro 6 in Europe and SULEV/PZEV in the USA, pose severe challenges on the quality of a car engine's combustion and exhaust aftertreatment systems. Since most of today's systems achieve very good emission control results under hot operating conditions, the tougher challenges are presented by the reduction of cold-start emissions and the rapid heating of the exhaust aftertreatment system. The following article by Pierburg and Audi shows how secondary air assists in achieving these goals besides examining other aspects of the secondary air process.

AUTHORS



DR.-ING. HOLGER PAFFRATH
is Senior Manager at Product Development in the Automotive Emission Systems business unit of Pierburg GmbH in Neuss (Germany).



DIPL.-ING. STEFAN PANHANS
is responsible for Powertrain Electric Motor Actuators at Audi AG in Ingolstadt (Germany).

GROWING SIGNIFICANCE

Secondary air injection is a key component in addressing the extensive requirements of low-consumption gasoline engine strategies with regard to low cold-start emissions, system robustness and durability. Even now it is a known variable and firm content of many applications. In order to achieve the mentioned requirements, however, it will in future grow in significance. The importance of secondary air injection is also emphasized by the SULEV/PZEV component of a 15-year endurance limit requirement for emission systems. This gives rise to further tough challenges with regard to component longevity and diagnosability. Market drivers and legislative requirements result, moreover, in a growing demand for a reduction in CO₂ emissions for internal combustion engines. In the wake of these developments, consumption-reduction strategies, such as downsizing, are of growing market significance and at the same time suggest the suitability of secondary air injection.

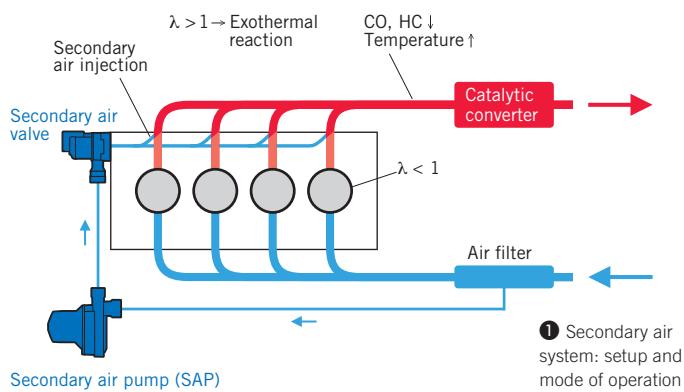
MODE OF OPERATION

Secondary air injection is primarily an instrument for reducing emissions following cold starts and for accelerating the heat-up of the catalytic converter on gasoline engines. To this end, during rich engine operation air is injected for a brief phase (around 20 to 60 s) directly into the

exhaust gas system. As a consequence a lean mixture develops in the exhaust gas stream. The key concept behind secondary air injection is to ignite the unburnt fuel contained in the exhaust (exhaust gas ignition or EGI).

During cold start, the engine runs on a rich mixture resulting in smooth, stable and zero-misfire operation at relatively low idling speed. An accompanying phenomenon of this rich mixture is the emission of incompletely combusted carbon monoxides (CO) and hydrocarbons (HC). But without secondary air injection, these would be discharged into the environment. With the aid of secondary air injection, most of the constituents are oxidized in the exhaust gas manifold upstream of the catalytic converter in an exothermal reaction; hence most of the CO and HC emissions are significantly reduced and, on the other hand, the inflow temperature in the catalytic converter rises allowing it to more quickly achieve the operating temperature, ①.

Despite the higher concentration of CO and HC in the combustion chamber under rich operating conditions, the emissions, as a consequence of aftertreatment with secondary air in the exhaust gas manifold, are lower than with leaner combustion without secondary air injection [3]. [2] shows a comparison of two versions of an engine indicating that secondary air injection allows a catalytic converter heating strategy which achieves a 80 °C higher



converter inflow temperature 20 s after test start. The cumulative HC emissions at 45 s following test start on the version with secondary air is 60 % lower than on the version without secondary air injection, ②. The rapid heating of the catalytic converter allows an early transition to controlled catalytic converter operation. The outcome is a significant reduction in NO_x emissions and this is not directly attributable to the exothermal reaction of secondary air injection but a consequence of the rapid heating of the catalytic converter. Most of the NO_x emission reduction occurs at a time in which the secondary air injection process has already been deactivated, ②.

Typical engine air/fuel ratios during the secondary air phase are lambda 0.7 to 0.9. Commonly in most applications, secondary air is continuously injected. A pulse injection rate synchronized with the engine charge exchange does not yield any advantages [3]. The air flow rate of the secondary air/fuel pump is not controlled as a factor of the engine operating point. The air/fuel ratio in the exhaust is the result of uncontrolled air injection and the air ratio within the engine. The exhaust air ratio is not constant regarding time and place. The mean is lambda 1.2 to 1.4. In most applications, air is injected in all exhaust ports. The reactivity of the exhaust gas is higher the closer secondary air injection is located to the exhaust valve.

Alongside the already-mentioned primary advantages of secondary air injection, in the past the sole focal point, nowadays new aspects have taken front seat, ③. Secondary air injection is increasingly being taken into consideration in the realization of low-consumption engine strategies. Also, since the emission advantages obtained through secondary air are not subject to any obso-

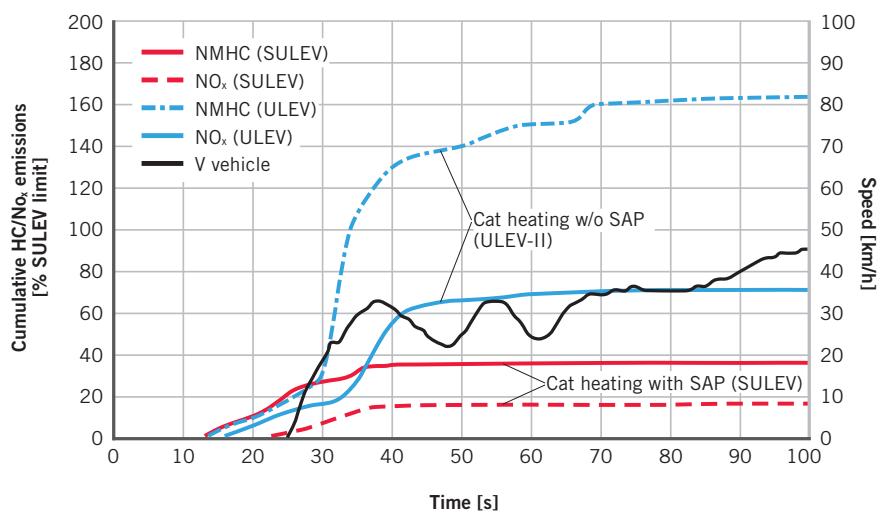
lence process and given the excellent ruggedness of the system as such, this technology is proving attractive for further applications. The CO_2 advantage obtained through secondary air does not result from the operating phases of the secondary air system itself. The advantage is indirect given that the use of a secondary air system allows the implementation of engine concepts and catalytic converter layouts which, during the entire service life of the engine, deliver fuel savings.

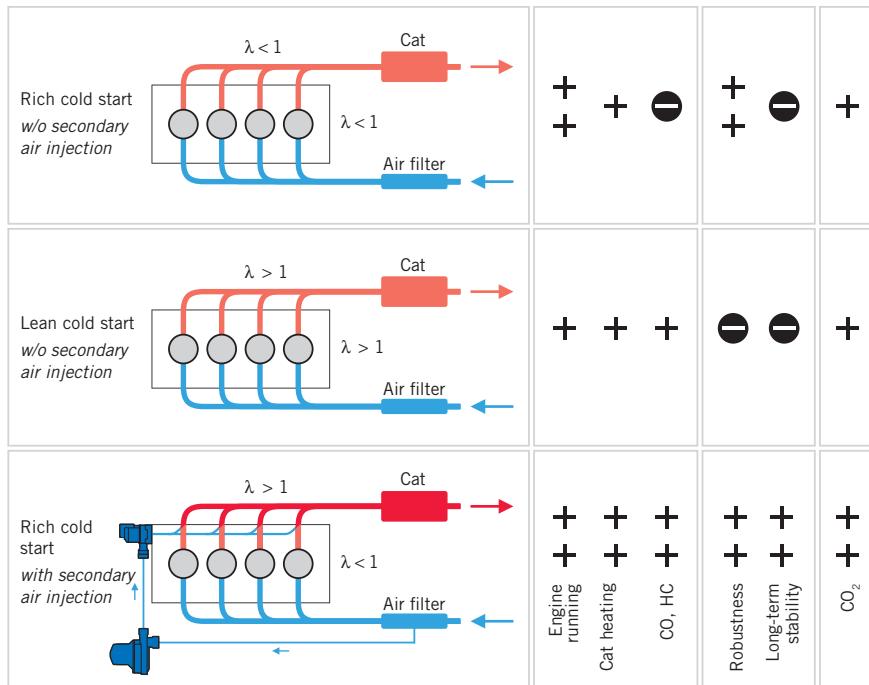
One example is the location of the catalytic converter. In order to achieve a rapid rate of heating, this is frequently positioned close to the engine. This gives rise to the need for converter cooling through mixture enrichment which, in turn, spells disadvantages in terms of fuel consumption. Particularly on the low-volume engines increasingly entering the market and frequently operating at high loads, this can impact on fuel consumption. The potential of additional exothermal effects

through secondary air injection can be exploited in order to heat rapidly enough a catalytic converter mounted at some distance from the engine. Such an arrangement reduces with the need for catalytic converter protection through mixture enrichment which, in turn, gives rise to higher fuel consumption.

Another example is the compensation of the heat drop caused by the turbocharger. Turbocharged engines must compensate for the loss of heat in the turbine in order to heat as quickly as possible the catalytic converter downstream of the turbine. The exothermal process of secondary air can support this and is therefore an opportunity of implementing low-consumption concepts such as direct-injection turbocharged gasoline engines.

The ruggedness of systems based on secondary air injection is indicated, among other factors, by the relatively wide lambda window in which the engine can be operated following cold start. Strategies without secondary air and a lean engine start-up have a narrower window and suffer more from any changes resulting from factors such as ambient conditions, fuel quality or possible production deviations during series manufacture. Moreover, emission advantages from secondary air are free from any negative effects. In contrast to catalytic converters which, for example, age thermally or chemically, secondary air throughout the service life of the engine, is a contribution toward emission reduction.





③ Comparison of various cold-start and catalytic converter heating strategies

SYSTEM STRUCTURE AND COMPONENT REQUIREMENTS

The key constituents of a modern secondary air system are the secondary air pump (SAP) and the secondary air valve, ①. The SAP normally extracts the air from the engine air filter via a line or, alternatively, its own secondary air filter. The air is pumped to the secondary air valve. This valve opens either the air path for the secondary air or blocks this in order to prevent the reflow of exhaust gas into the secondary air system. Just as the secondary air pump which operates unregulated at constant voltage, the valve is not controlled in its stroke in order to prevent any effects on the volume of secondary air. Downstream of the valve, the secondary air is routed into the exhaust gas system. Preferably this is through an air distribution bore and branch passages in the cylinder head. Certain systems are supplemented with sensors (pressure or mass air flow sensors) if only for diagnostic purposes.

Secondary air systems have been used in this way since the end of the 1980s. Apart from the sensors, there has not been any change to the fundamental set-up. However, over the years the requirements to be met by the system and its

components have been steadily adapted to the existing conditions. Whereas in the past, the operating times ranged between 60 and 90 s, for future applications these will be less than 20 s. The typical exhaust gas backpressures for the secondary air systems had been some 100 mbar. As a consequence of turbochargers and exhaust gas aftertreatment components, the operating pressure is rising in the direction of 140 mbar and even higher. The materials making up the components have to be adapted to the increased use of biogenetic fuels. Not least of all due to the requirements of on-board diagnosis (OBD), systems are changing in the selection of components, operating modes and as a result of the addition of sensors. Among the requirements to be met by the secondary air pump are a shorter maximum capacity run-up time (the time required to reach 90 % of the rated capacity), a compact footprint, a high rate of air flow at high operating pressure and low air and structure-borne noise emissions. Whereas in the past the period up to the rated pumping capacity had not been a decisive criterion, this has now changed with the ever shorter operating time. The shorter the operating time, the more important it is to achieve the rated pumping capacity.

COMPARISON WITH ELECTRICALLY HEATED CATALYTIC CONVERTER

Theoretically, rapid converter heating to operating temperature is also possible with an electrically heated converter. The advantage of this arrangement is the possibility of very quick heating. To fully exploit this potential, it is necessary to ensure very high electric power density. Since this is not possible with a conventional 12-V vehicle electrical system, the electrically heated catalytic converter must be operated via a separate partial vehicle electrical system with a higher voltage. Basically, this comprises the following components: an electronic power switch, additional battery, DC/DC converter, power control unit and high-voltage wiring. A further advantage of the electrically heated catalytic converter is the option of starting the heating of the converter even before the engine is switched on, for example via an ignition signal (terminal 15). In contrast, the best possible engagement time for the SAP is the moment of starter actuation with the exothermal reaction by nature being slightly delayed, beginning after the initial ignition.

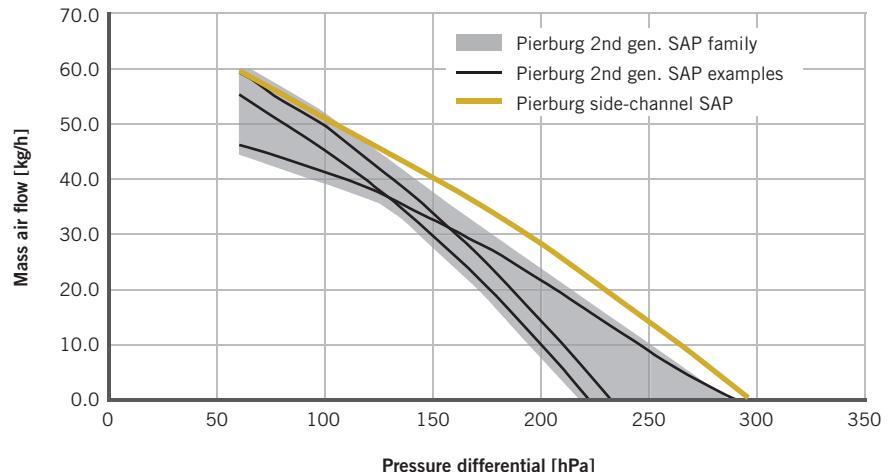
All the above-mentioned components of the electrical catalytic converter system including the electrical catalytic converter itself must be diagnosable (mandatory OBD) and provide constant performance throughout service-life. Given the high complexity of the electrically heated converter, the manufacturing input is much higher compared with a secondary air system. It will not be possible to achieve the robustness of a secondary air system. A further disadvantage of the electrically



④ The new side-channel secondary air pump from Pierburg



5 Air flow on the new side-channel secondary air pump



6 Air throughput characteristics on a selected secondary air pump from Pierburg

heated catalytic converter occurs during repeated short-distance operation. This is where excessive discharge will lead to a gradual draining of the battery each time the engine is restarted. If this occurs, it will be necessary to deactivate the converter heating. This leads to OBD problems and must be indicated by a warning light. With its relatively low power consumption the secondary air pump, in contrast, does not overdrain the battery since its energy requirement can be completely met by the generator. Finally, the costs of an electrically heated converter system, if only because of the expense involved by the separate voltage supply, is a multiple of the secondary air system. As a consequence, the advantages are evident. From today's vantage point, an electrically heated catalytic converter is not a viable option.

SIDE-CHANNEL SECONDARY AIR PUMP

Pierburg GmbH has developed a new secondary air pump that addresses the increasingly sophisticated requirements, ④. In contrast to the well-known second-generation Pierburg pumps with two-stage radial blower [1], the new pump delivers the air with the aid of a single-stage side-channel blower parallel and with one channel on either side of the impeller, ④ and ⑤. The impeller is driven by a DC motor bolted to the pump housing. Housing and cover options along with a variety of motor designs allow the assembly to be flexibly and quickly adapted to customer requirements. The new pump combines the ad-

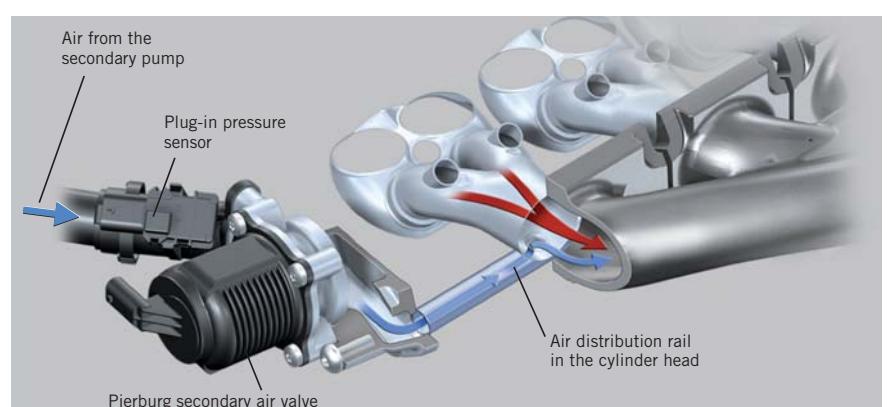
vantages of very high capacity with, at the same time, a small footprint. At a low operating pressure (around 100 mbar) the first versions of this pump are already at the top range of what had been achievable with the second-generation pumps, ⑥. With higher operating pressures (around 140 mbar) the much smaller side-channel pump is superior to the larger pumps of

the second-generation Pierburg model ⑦ and competition. By optimizing the moment of inertia and motor characteristics, it has been possible to reduce by up to 75 % the time taken to achieve maximum capacity and this is now only 300 ms.

A major challenge was to retain the excellent acoustic properties of the second-generation pump with centrifugal blower



7 Size comparison between the second-generation Pierburg SAP and the new side-channel SAP



8 Example of installation of a Pierburg ESV with plug-in pressure sensor [2]



❾ Pierburg ESV with integrated pressure sensor

and even improve these. With minimum imbalance of motor and impeller, the rotor of the secondary-channel SAP from Pierburg unit is ideal for reducing structure-borne noise. By designing the pump with its center of gravity in the mounting level of the vibration damper and carefully selected vibration damper geometry, the structure-borne noise transmitted to the engine or vehicle body is further reduced. This pump is therefore suitable for engine or vehicle body mounting. Airborne noise, frequently an unwanted property of side-channel blowers, has been further decreased by adapting the channel contours and the impeller; as a consequence, the aggregate noise level of this pump is superior to that of competitive products and even slightly better than that of the second-generation Pierburg SAP. Furthermore, the frequently irritating noise emitted by the first set of blades on side-channel blowers has been eliminated.

SECONDARY AIR VALVES

Pierburg's proven secondary air valves, model ARV (vacuum actuated, independently of the pump) and SLV (actuated by pump pressure, no separate actuation) continue to meet the requirements of many applications. Increasingly, however, new applications have been provided with a solenoid operated (model ESV) Pierburg valve first introduced into series production in 2007, ❷. The main advantages of this valve are its rapid opening and closing independently of any vacuum, pump pressure or ambient pressure, the high

opening force and the small footprint. The ESV shares with the two other models, ARV and SLV, the valve closing unit design with integrated automatic valve destined to prevent unwanted return flows of exhaust into the secondary air circuit. The outstanding feature of Pierburg's ESV is a very high opening force of around 80 N despite the slight space taken up by the magnet's coil. This is achieved with the aid of a split armature. With closed valve, this allows high magnetic flux line focus and a reduced effective pole clearance.

All Pierburg secondary air systems and their components are OBD compatible with mass air flow or pressure sensors. For those arrangements working on the basis of pressure measurements in the secondary air system, Pierburg has two options. The first is a version of the plug-in pressure sensor, ⑧, which allows ample flexibility in the selection and positioning of the sensor. Secondly, Pierburg offers the option of a pressure sensor, ❾, integrated with the actuator. This reduces the footprint and eliminates the necessity of a separate electric contact. The integrated sensor is an absolute pressure sensor with a ratiometric, analog output signal. The characteristic curve is programmable. On both versions, with the internal sensor and with the plug-in version, the actuator and hence the electric plug can be rotated in 90° steps with relation to the housing. On the integrated sensor version, a circular channel permits this by transmitting the pressure signal from the housing to the actuator in each of the four settings. The low footprint, the modular structure and the replaceable

contacts allow space-saving attachment directly at the cylinder head with reduced pressure losses.

SUMMARY

Secondary air injection has proven to be a robust, highly durable and, overall in the vehicle systems, cost-effective approach for emission reduction. Its potential of assisting in low-consumption strategies is increasingly gaining attention. The further development of these products must keep pace with changing requirements. Pierburg's new SAP and the further development of the valve are destined for secondary air injection on a variety of applications. Due to the growing significance of factors in which secondary air injection demonstrates its advantages, it will find increasing use. This is particularly the case on SULEV applications. Alternative strategies with similar objectives, e.g. HC traps or electrically heated catalytic converters, individually address these aspects do not, however, achieve such an overall positive impact as secondary air injection.

OUTLOOK

Secondary air systems are suitable not only for emission reduction on gasoline engines. On diesel engines, additional fresh air in the manifold could altogether improve the oxidation of hydrocarbons and carbon monoxide and hence reduce emissions altogether. Analyses carried out by Pierburg have indicated that secondary air can also be applied for significantly raising diesel exhaust temperature. Another study indicates that an increase in mean exhaust temperature of 20 to 30 °C would raise overall cycle CO conversion rates by up to 70 % [4].

REFERENCES

- [1] Kochs, M. W.; Kloda, M.; van de Venne, G.; Golden, J.: Innovative Secondary Air Injection Systems. SAE Paper 2001-01-0658, 2001
- [2] Eiglmeier, C.; Pfalzgraf, B.; Helbig, J.; Adam, S.; Grigo, M.; Dornhöfer, R.: Der neue R4 – 2.0 l TFSI SULEV/PZEV-Motor von Audi. 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorenmechanik, 2007
- [3] Hallgren, B. E.; Heywood, J. B.: Effects of Substantial Spark Retard on SI Engine Combustion and Hydrocarbon Emissions. SAE Paper 2003-01-3237, 2003
- [4] Neumann, D.; Schrade, F.; Basse, N.; Schäffner, J.; Tschiggfrei, W.; Krämer, L.: Kohlenmonoxid – Die neue Emissionshörausforderung für Diesel-Pkw. In MTZ 70 (2009) Nr. 7/8