

driven
by knowledge



Dr. Frank Schmitt, Dipl.-Ing. Hans-Peter Schmalzl, Dipl.-Ing. Patrick Descamps

Neue Erkenntnisse bei der □
Entwicklung von □
Aufladesystemen für □
Pkw-Motoren

Veröffentlicht: Feb. 2003

Academy



Einführung

Die Abgasgesetzgebung mit ihren strengen Vorschriften für Abgasemissionen und die Forderung nach Verbrauchsreduktion für Pkws bestimmen die Entwicklung neuer Motoren. Die Abgasturboaufladung stellt neben dem Einspritzsystem und der Motorsteuerung eine wichtige technische Komponente zur Erfüllung künftiger Emissions- und Verbrauchsanforderungen dar [1]. Beim Dieselmotor ist die Turbine mit variabler Leitschaufelgeometrie (VTG) bereits Stand der Technik und hat zu wesentlichen Verbesserungen bezüglich Verbrauch und Fahrdynamik geführt.

Die Vorteile des aufgeladenen Direkteinspritzer-Dieselmotors hinsichtlich Kraftstoffverbrauch und Motorleistung können teilweise auf den Ottomotor übertragen werden [2]. Bei der Aufladung von Ottomotoren ist ein Turbolader mit Abblaseklappe (Waste-Gate Lader) derzeit Stand der Technik [3]. Eine gegenüber dem einflutigen Waste-Gate Lader verbesserte Ausnutzung der Abgasenergie wird mit einer 2-flutigen Turbine (Twin Scroll) erzielt. Diese Technik führt durch die Absenkung des Abgasgedrucks bei niedrigen Motordrehzahlen aufgrund einer verbesserten Ausnutzung der Stoßenergie zu einer Verbrauchsreduktion oder Drehmomenterhöhung je nach Auslegungsziel. Für die Entwicklung von Aufladesystemen für Ottomotoren müssen besondere Anforderungen hinsichtlich Abgastemperatur [4] und Durchsatzbereich erfüllt werden. Mit der Entwicklung eines bis 1050°C beständigen Waste-Gate Turboladers hat BorgWarner Turbo Systems (BWTS) diese Anforderung erfüllt. Bei einer VTG für ottomotorische Anwendung stellen diese besonderen Anforderungen eine große Herausforderung an die Konstruktion dar.

Die Entwicklung aufgeladener, kleinvolumiger Motoren führt zu einer erhöhten Leistungsdichte mit einer Verbrauchsreduktion im Vergleich zu großvolumigen Saugmotoren (Downsizing). Um das im Vergleich zum maximalen Drehmoment und der Leistung bei Nenndrehzahl etwas schwache Anfahrtdrehmoment auszugleichen, werden weitere Entwicklungen im Bereich der Abgasturboaufladung vorangetrieben [5]. Lösungen, die diesem Kundenwunsch entsprechen, bieten Turbolader mit variablem Verdichter und Turbine, die 2-stufig geregelte Aufladung [6] sowie die Kombination von Turbolader und eBooster™ [7]. Das erhöhte Anfahrtdrehmoment erfüllt die Forderung des Kunden nach hoher Fahrdynamik und entsprechendem Fahrkomfort.

Die Konzepte zur Verbesserung des Anfahrtdrehmoments und Verbrauchsreduktion durch 2-stufig geregelte Aufladung, den Einsatz eines eBoosters™ oder die Verwendung von Turbinen und Verdichtern mit variabler Geometrie können schon in einem frühen Entwicklungsstadium untersucht werden [8]. Von wachsender Bedeutung ist die Untersuchung des transienten Verhaltens von aufgeladenen Motoren. Das Instationärverhalten des Motors kann mit einem Ladungswechselprogramm ebenfalls abgebildet werden. Die Simulation instationärer Vorgänge bietet sich bei der Untersuchung des eBoosters als auch bei der 2-stufig geregelten Aufladung an, um eine geeignete Regelungsstrategie zu ermitteln.

Abgasturbolader für Pkw-Diesel-Motoren

Der Beginn für konsequentes Downsizing beim Dieselmotor liegt in der Mitte der 80er Jahre. Zu diesem Zeitpunkt startete ein breiter Übergang vom Saugmotor zum aufgeladenen Motor. Beim aufgeladenen Motor mit Waste-Gate Regelung wurde das Verdichterkennfeld noch moderat genutzt. Beim Übergang zum ATL mit variabler Turbinengeometrie ist eine Ausnutzung des gesamten Kennfeldbereichs von Turbine und Verdichter möglich. Dadurch kann bei niedriger Motordrehzahl und geringer Abgasmenge bereits ein hoher Ladedruck erreicht werden. Neben der Erhöhung des Mitteldrucks, vergleiche Abbildung 1, konnte auch das Anfahrtdrehmoment erheblich gesteigert werden, was zu einer merklichen Verbesserung hinsichtlich Fahrspaß geführt hat.

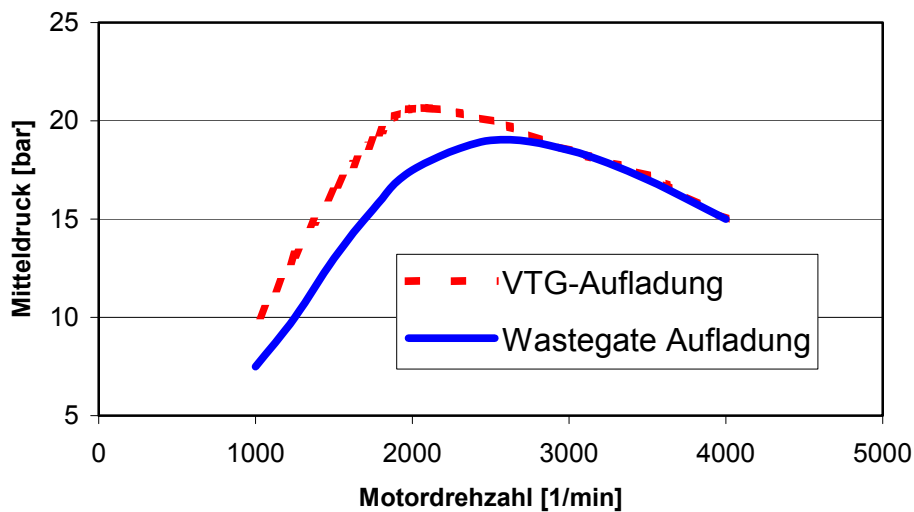


Abb. 1: Mitteldruckverlauf eines Dieselmotors mit Wastegate-ATL bzw. VTG

2.1 Abgasturbolader mit variabler Turbinengeometrie

Ein Ziel einer geregelten Turbine ist, den in der Praxis nutzbaren Durchsatzbereich bei guten Wirkungsgraden zu erweitern. Dazu wird die Turbinenleistung durch Veränderung von Anströmungswinkel und -geschwindigkeit am Turbinenradeintritt geregelt. Im Fall der VTG-Turbolader von BWTS geschieht dies durch vor dem Turbinenrad angeordnete Leitschaufeln, wie sie in Abb. 2 dargestellt sind.

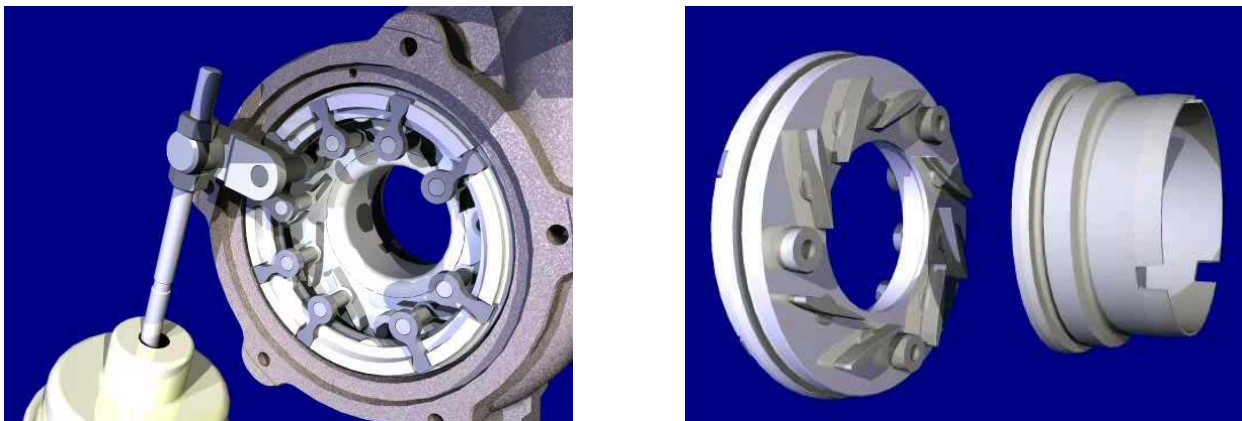


Abb. 2: Darstellung eines Abgasturboladers mit variabler Leitschaufelgeometrie: Turbine mit Steuerdose (links) und Leitapparat mit Leitschaufeln (rechts)

In geschlossener Leitschaufel-Position führen hohe Umfangskomponenten der Strömungsgeschwindigkeit und ein hohes Enthalpiegefälle zu einer hohen Turbinenleistung und damit einem hohen Ladedruck. In voll geöffneter Position der Leitschaufeln erschließt sich der maximale Durchsatz der Turbine bei hohem zentripetalem Anteil des Geschwindigkeitsvektors der Strömung. Der Vorteil dieser Leistungsregelung gegenüber einer Bypass-Regelung liegt darin, dass immer der volle Abgasmassenstrom über die Turbine geleitet und zur Leistungsumsetzung genutzt wird. Die Ansteuerung der Schaufeln erfolgt durch Hebel, die über einen im Turbinengehäuse untergebrachten Verstellring angesteuert werden. Dieser wiederum kann über eine Reihe von verschiedenen pneumatischen oder elektrischen Stellern angetrieben werden.

BWTS bietet zur Zeit verschiedene Baugrößen von Abgasturboladern mit variabler Turbinengeometrie für Dieselmotoren an, die eine Bandbreite von 1,2l (BV35) bis 3,2l Hubraum (BV50) pro Turbolader abdecken; in Motorleistungen ausgedrückt bedeutet dies eine Spanne von 50kW bis 180kW pro Turbolader. Jede Ausführung deckt dabei eine wirtschaftlich nutzbare Durchsatzspanne (Verhältnis von maximalem zu minimalem Durchsatz) von mindestens 3 ab. Um dies zu realisieren, hat BWTS eine Reihe von sog. „High-Flow“-Turbinenrädern entwickelt, die einen vergrößerten Durchsatzbereich bei hervorragenden Wirkungsgraden bieten. Die Anforderungen an Abgasturbolader mit variabler Turbinengeometrie sind in den vergangenen Jahren stetig angestiegen. War vor einiger Zeit noch eine Literleistung von 35kW/l ausreichend, so liegt der aktuelle Stand der Technik bei 50-58kW/l. Mit verbesserter Abgasturboladertechnik wird eine literspezifische Leistung von Werten bis 65kW/l erreicht werden. Als Folge dieser höheren Anforderungen steigen Abgastemperaturen und Druckverhältnisse im Abgassystem. Zur Zeit sind BWTS Abgasturbolader mit variabler Turbinengeometrie für Abgas-temperaturen bis 850°C verfügbar, in Zukunft wird es Turbolader für Dieselmotoren mit Abgastemperaturen bis zu 900°C geben.

Die Auslegung des Aufladesystems kann durch die Motorprozeßrechnung unterstützt werden. Bei der Motorprozeßrechnung wird ein eindimensionales mathematisches Modell erstellt, das die Betriebsverhältnisse am Motor sehr genau abbildet. Dieses Modell enthält die Geometriedaten der Frischluft- und Abgasseite, Werte für die Wandtemperaturen, Einlaß- und Auslaßkanal mit Durchflußwerten, Zylinder- und Kolbengeometriedaten, Informationen zum Einspritzsystem einschließlich Verbrennung, Ventilerhebungskurven und weitere Motordaten. Als Randbedingungen werden der Umgebungsdruck und -temperatur vorgegeben. Der Druckabfall im Luftfilter und dem Ladeluftkühler sowie dem Abgassystem werden berücksichtigt. Verdichter und Turbine werden mit Hilfe von stationär gemessenen Kennfeldern aus Brennkammerversuchen in das Modell integriert.

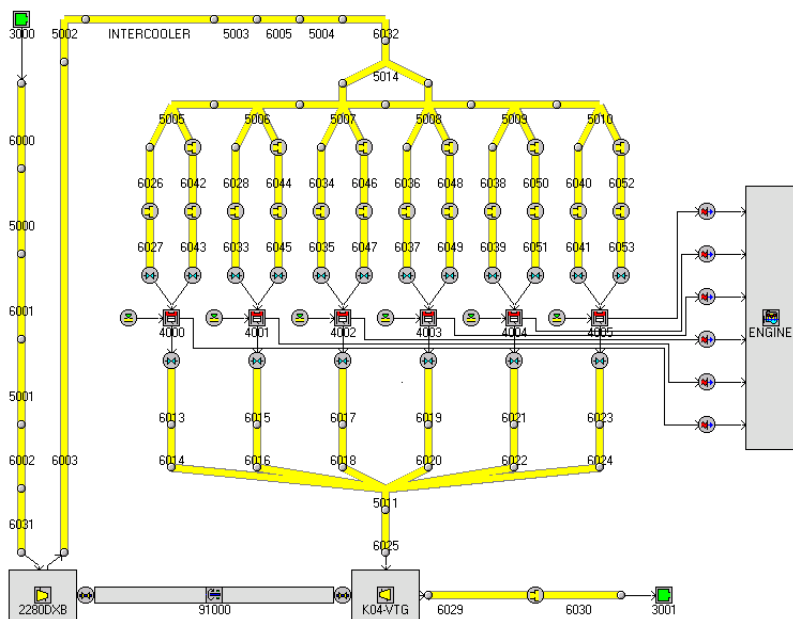


Abb. 3: Simulationsmodell für einen 6-Zylinder Dieselmotor mit variabler Turbinengeometrie

Bei einer variablen Geometrie (z.B. VTG) müssen mehrere Kennfelder für unterschiedliche Stellungen des Leitapparates aufgenommen werden. In Abb 3. ist ein Simulationsmodell eines 6-Zylinder Dieselmotors mit variabler Turbinengeometrie dargestellt. Das verwendete Simulationsprogramm ist GTPower [9].

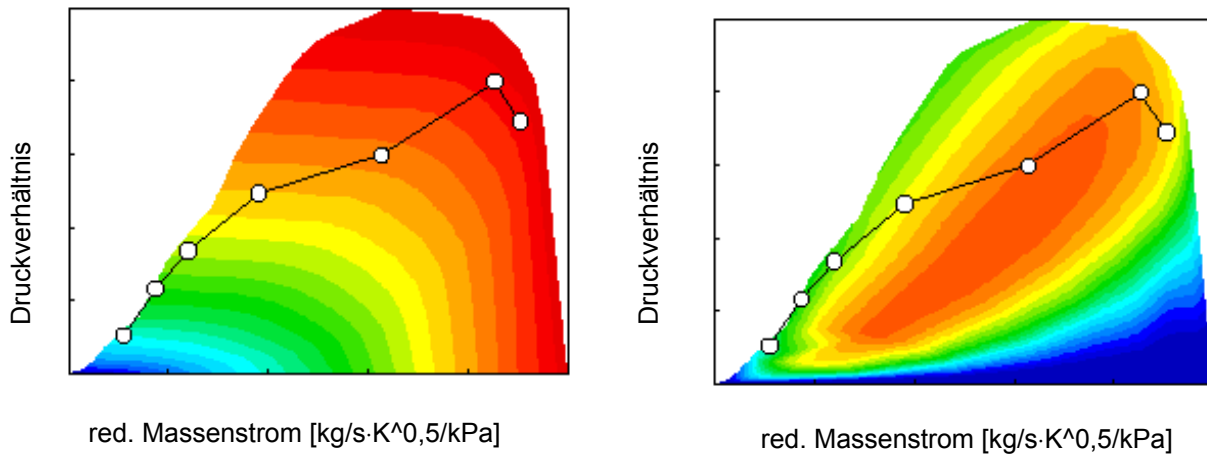


Abb. 4: berechnete Drehmomentkurve im Verdichterkennfeld (Verdichterdrehzahl bzw. Wirkungsgrad hinterlegt)

Für verschiedene Drehzahlen lassen sich Kennwerte wie Leistung, Drehmoment Kraftstoffverbrauch und Verbrennungsluftverhältnis berechnen. Für die Auslegung von Verdichter und Turbine ist die Lage der Drehzahlpunkte im Kennfeld wichtig. Als Beispiel ist in Abb. 4 die Drehmomentlinie im Verdichterkennfeld dargestellt. Die Bilder zeigen das Druckverhältnis über dem reduzierten Massenstrom für den Verdichter. Im linken Bild ist die reduzierte Laderdrehzahl hinterlegt, rechts der Wirkungsgrad des Verdichters.

2.2 Abgasturbolader mit variabler Verdichtergeometrie (Vordrallregler)

Aus der Forderung der Motorenhersteller nach der Erzielung des maximalen Drehmoments bei geringen Motordrehzahlen ergibt sich die Aufgabenstellung für BWTS zur Entwicklung von Aufladesystemen mit einem möglichst breiten Arbeitsbereich.



Abb. 5: D-flow Verdichterrad

Auf der Turbinenseite ist diese Anforderung durch die Anwendung der VTG-Technik mit Hi-Flow Turbinenrädern erfüllt, so dass dieser nun erweiterte Arbeitsbereich im Gegenzug auch verdichterseitig verfügbar sein muss [10].

Durch die Entwicklung der neuen D-Flow Verdichterradbaureihe wurde von BWTS dieser Forderung nach einem verbreiterten Verdichterkennfeld bei zusätzlich gesteigerten Druckverhältnissen und sehr guten Wirkungsgraden entsprochen (s. Abb. 5). Zusätzlich ermöglicht die festigkeitsoptimierte Verdichterradgeometrie einen Betrieb bei hohen Drehzahlen und hoher Lebensdauer.

Aktuell wird bei BWTS, aufgrund der beschriebenen, weiter steigenden Forderungen - insbesondere bei hochaufgeladenen Motoren - ein System zur Regelung des Verdichters untersucht. Generell sind hierbei Regelungen mittels Vor- und Nachleitbeschauelung bzw. Bypassregelung möglich. Aus Abb. 5 ist ersichtlich, dass die Gesamtkennfeldbreite zunimmt und dadurch bereits bei niedrigsten Motordrehzahlen ein hoher Ladedruck gehalten werden kann ohne die Pumpgrenze des Verdichters zu erreichen. Die Pumpgrenze des Verdichters wandert durch den Vordrallregler bei stark drallbehafteter Strömung nach links. Bei kleinen Motordrehzahlen kann der Ladedruck angehoben werden, ohne daß Pumpprobleme auftreten. Das maximale Drehmoment kann bereits bei kleinerer Motordrehzahl erreicht werden.

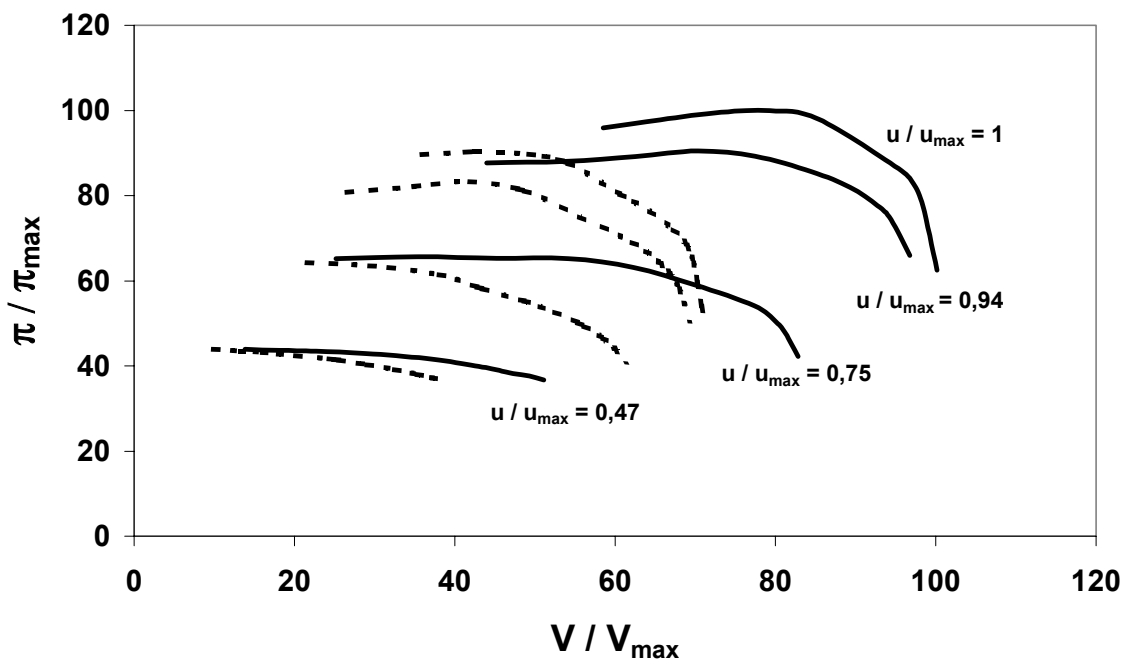


Abb. 6: Änderung eines Verdichterkennfeldes eines Pkw-Abgasturboladers durch Vordrallregelung bei $\alpha = 0^\circ$ (drallfrei) und $\alpha = 75^\circ$ (drallbehaftet, Mitdrall)

2.3 System der 2-stufig geregelten Aufladung (Regulated 2-Stage R2S™)

Eine Erhöhung des Anfahrtdrehmoments sowie der spezifischen Leistung und des Drehmoments gegenüber einem Abgasturbolader mit variabler Turbinengeometrie kann mit Hilfe der 2-stufig geregelten Aufladung erreicht werden. Bei der 2-stufig geregelten Aufladung werden 2 Turbolader in Serie angeordnet, ein ‚großer‘ Niederdruck-ATL und ein ‚kleinerer‘ Hochdruck-ATL, vergleiche Abb. 7.

Bei hohen Motordrehzahlen wird nur die Niederdruck-Turbine durchströmt, um die Verdichterleistung zur Verfügung zu stellen. Die Hochdruck-Turbine wird durch den Bypass umströmt. Auf der Frischluftseite wird der Hochdruck-Verdichter mit geringem Druckverlust

durchströmt. Die Druckverluste können durch einen Bypass des Hochdruck-Verdichters vermieden werden. Dieser Zustand entspricht der konventionellen, einstufigen Aufladung. Bei geringen Drehzahlen ist der Bypass der Hochdruck-Turbine komplett geschlossen. Dadurch wird die Abgasenergie dazu verwendet, die Frischluft im Hochdruck-Verdichter zu komprimieren. Der Hochdruck-ATL ist dazu für den geringen Massenstrom bei niedrigen Drehzahlen ausgelegt. Der Niederdruck ATL übernimmt aufgrund des geringen Abgasangebotes nur einen geringen Teil der Aufladung. Im mittleren Drehzahlbereich erfolgt die Aufladung klassisch 2-stufig, wobei die Aufteilung zwischen den Stufen durch den turbinenseitigen Bypass erfolgt. Eine ‚kontinuierliche‘ Regelung zwischen den beiden ATL-Stufen ist durch das Bypass-Ventil möglich.

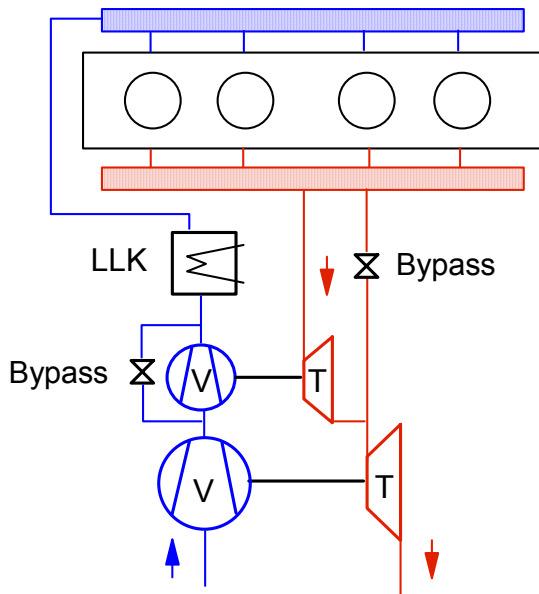


Abb. 7: Schaltbild für die 2-stufig geregelte Aufladung

Das Ziel der 2-stufig geregelten Aufladung ist in erster Linie ein erhöhtes Anfahrtdrehmoment. Aber auch im mittleren Motordrehzahlbereich ist eine erhebliche Mitteldruckanhebung unter gewissen Randbedingungen, wie beispielsweise die Einhaltung des maximalen Zünddrucks, möglich. Abb. 8 zeigt den Mitteldruckverlauf für den Basis-Zustand. Zusätzlich ist der errechnete Mitteldruckverlauf, den man mit einer 2-stufig geregelten Aufladung erreichen kann, in das Diagramm eingetragen. Wie durch Messungen an verschiedenen Motoren nachgewiesen wurde, kann eine Anhebung des Drehmoments bei einer Motordrehzahl von $n=1000$ U/min von ca. 40 % erzielt werden. Bei dieser Drehzahl erfolgt der Ladedruckaufbau nahezu vollständig über den Hochdrucklader. Bei der maximalen Motordrehzahl von $n=4000$ U/min wird die Hochdruckturbine umgangen (Bypass), der Druckaufbau erfolgt über den Niederdruck-Turbolader. Im mittleren Drehzahlbereich arbeiten beide Stufen in Serie. Der Vorteil dieser Anordnung ist deutlich in einem wesentlich breiteren Durchsatzbereich und einem höheren möglichen Verdichterdruckverhältnis durch den 2-stufigen Betrieb zu sehen.

Die Regelung des Systems kann durch pneumatische Aktuatoren erfolgen, die auf Bypassklappen wirken, wie sie in konventionellen Waste-Gate Abgasturbo ladern in Großserie eingesetzt werden. Damit ist es möglich bei detaillierter Kenntnis des komplexen Systemverhaltens ein kompaktes Aufladesystem darzustellen, das unter Verwendung bewährter Komponenten höchste Anforderungen an Drehmoment, Ansprechverhalten und Leistung erfüllt.

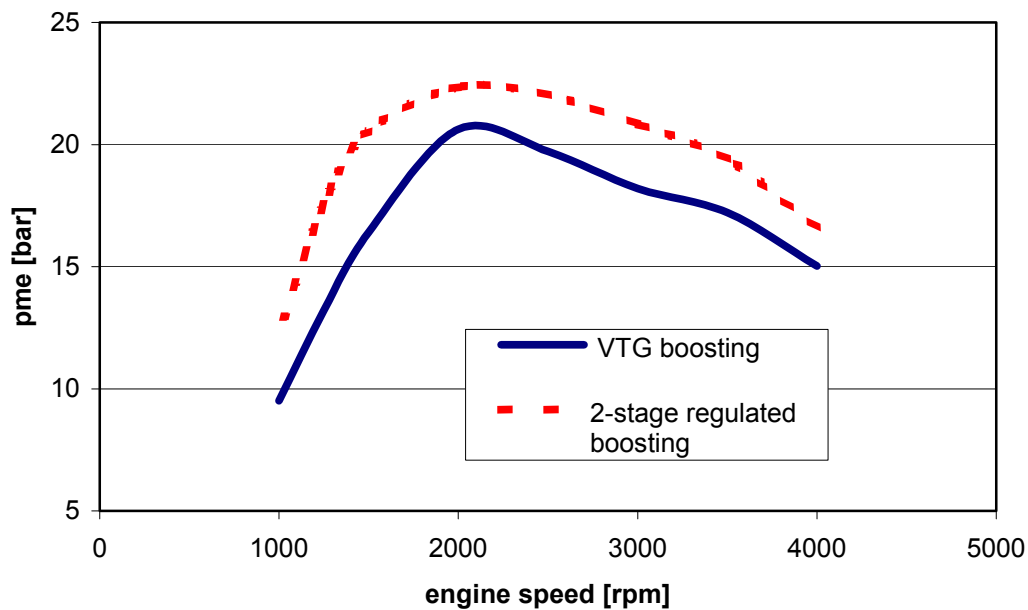


Abb. 8: Mitteldruckverlauf für einen Dieselmotor mit verschiedenen Aufladekonzepten

Abgasturbolader für Pkw-Otto-Motoren

Die Europäische Vereinigung der Automobilhersteller ACEA hat sich zu einer Reduzierung des durchschnittlichen CO₂-Ausstosses von Neufahrzeugen bis zum Jahr 2008 auf 140 g/km bzw. bis zum Jahr 2012 auf 120 g/km verpflichtet. Ausgehend von einem CO₂-Ausstoss von ca. 190 g/km im Jahr 2000 wird deutlich, welche Anstrengung notwendig sein wird, dieses Ziel zu erreichen. Eine Möglichkeit stellt das Downsizing für Ottomotoren dar. Der Pkw-Motor mit Benzin-Direkteinspritzung und variablem Ventiltrieb ist geradezu prädestiniert dafür in Kombination mit einer optimalen Turboaufladung diese Anforderung zu erfüllen.

3.1 Abgasturbolader für Pkw-Motoren mit Benzin-Direkteinspritzung

Mit der Markteinführung der Pkw-Motoren mit Benzin-Direkteinspritzung (BDI) eröffnet sich ein großes Potential für aufgeladene Otto-Motoren. Bisher waren abgasturboaufgeladene Benzin-Motoren mit Saugrohreinspritzung ab 1,8 ltr. Hubraum hauptsächlich beschränkt auf mittlere und höhere Leistungsklassen im Hinblick auf größeren Fahrspaß. Neben der besseren Dynamik ermöglicht der aufgeladene DI-Otto-Motor eine Kraftstoffeinsparung, die bei konsequentem Downsizing erzielt werden kann. Begründet ist diese Möglichkeit zur Reduzierung des Verbrauchs und der daraus resultierenden CO₂-Einsparung in einer Reihe von Unterschieden zwischen einem aufgeladenen Otto-Motor mit Saugrohreinspritzung und einem aufgeladenen Direkteinspritzer-Otto-Motor mit variablem Ventiltrieb, auf die im folgenden näher eingegangen wird [11,12,13].

Variabler Ventiltrieb

Bei saugrohreinspritzenden Otto-Motoren ist die Verwendung einer variablen Ventilsteuerung nur sehr eingeschränkt möglich. Eine zu hohe Überschneidung der Ventilsteuerzeiten birgt die Gefahr des Durchblasens von unverbranntem Benzin-Luft-Gemisch. Beim direkt einspritzenden Otto-Motor erfolgt die Einspritzung erst nach dem Schliessen der Auslassventile. Dadurch werden bei positivem Spülgefälle große Ventilüberschneidungen möglich, die neben der Erhöhung des Luftdurchsatzes auch eine bessere Kühlung des Zylinders ermöglichen.

Drehmomentsteigerung

Durch die verbesserte Kühlung des Zylinders steigt der Füllungsgrad. Dies führt zu einer erheblichen Steigerung des Drehmoments bei niedrigen Drehzahlen.

Verdichtungsverhältnis

Wegen der geringeren Klopfempfindlichkeit aufgrund der verbesserten Zylinderkühlung muß das Verdichtungsverhältnis gegenüber dem Saugmotor weit weniger reduziert werden als bei aufgeladenen, saugrohreinspritzenden Otto-Motoren. Dieses Phänomen führt zu einer Wirkungsgradsteigerung.

Zweiflutige Turbine

Die Absenkung des Abgasgegendruckes bei niederen Motordrehzahlen durch eine zweiflutige Turbine (Twin Scroll) verbessert das Spülgefälle und hat gerade beim Direkteinspritzer Ottomotor mit variablem Ventiltrieb daher ein signifikantes Potential zur Drehmomentsteigerung, weil durch einen erhöhten Luftaufwand der Massendurchsatz erheblich gesteigert werden kann.

Die Vorteile des direkteinspritzenden aufgeladenen Ottomotors mit variablem Ventiltrieb werden in Abbildung 9 deutlich. Im Vergleich zum saugrohreinspritzenden aufgeladenen Ottomotor, dargestellt sind Motorergebnisse (rot), ist das Anfahr Drehmoment sowie der Mitteldruck im mittleren Drehzahlbereich beim dem ausgelegten DI-Otto sehr viel höher. Die Nennleistung ist für beide Motoren gleich.

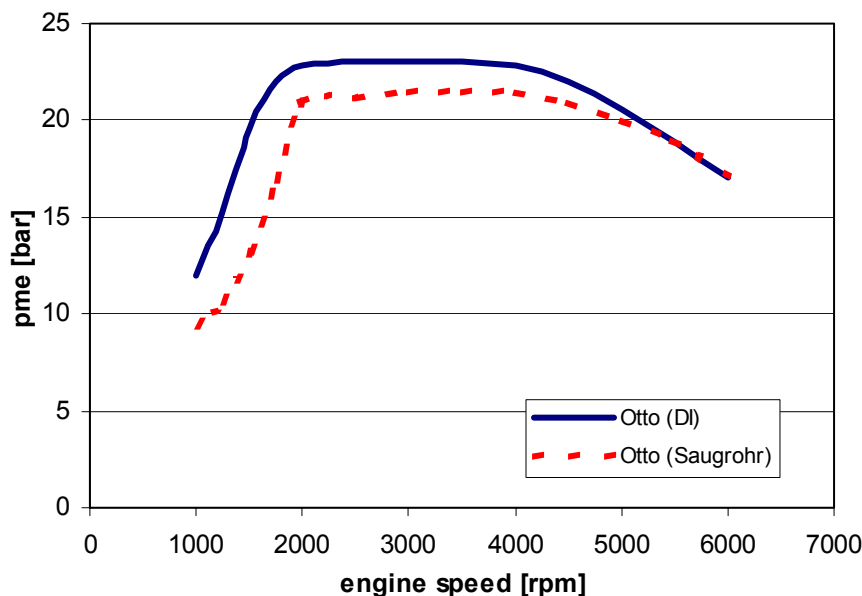


Abb. 9: Mitteldruckverlauf für Ottomotoren mit verschiedenen Einspritzsystemen

Bei saugrohreinspritzenden Otto-Motoren mit kleinem Hubvolumen hat sich das Downsizing-Konzept bisher im Gegensatz zum Diesel-Motor nicht durchgesetzt. Der Grund dafür lag unter anderem am schlechten Anfahr Drehmoment des kleinen, aufgeladenen Otto-Motors. Durch die oben erwähnten Vorteile und ersichtlichen Mitteldrucksteigerungen sind die Voraussetzungen für konsequentes Downsizing bereitgestellt

Das Drehmoment bei einem direkt einspritzenden, aufgeladenen 1,1 ltr. Otto-Motor übertrifft das Drehmoment eines 1,8 ltr. Saugmotors bereits ab 1300 U/min, das Drehmoment eines 1,3 ltr. saugrohreinspritzenden Turbo-Motors dagegen erst ab ca. 1600 U/min. Ausgelegt sind die verglichenen Motoren auf die gleiche Nennleistung [2].

3.2 Elektrisch angetriebener Strömungsverdichter (eBooster™)

In der Einführung wurde bereits die Wichtigkeit von verbesserter Fahrdynamik angesprochen. Diese Eigenschaft gewinnt speziell vor dem Hintergrund des Downsizings immer mehr an Bedeutung, bei dem vergleichsweise hubraumkleine aufgeladene Motoren in schweren Fahrzeugen eingesetzt werden. Beim Ottomotor tritt diese Problematik durch die große Luftdurchsatzspanne zwischen Leerlauf und Volllast noch stärker in den Vordergrund. Zur Untersuchung von Beschleunigungsverhalten und Lastwechsel müssen die Simulationswerkzeuge transiente Betriebszustände unterstützen. Am Beispiel der Optimierung des Beschleunigungsverhaltens mittels eBooster [14] soll der Einsatz der Berechnung erläutert werden. Dieses System besteht aus einer 2-stufigen Aufladung, vergleiche Schaltbild in Abb. 10. Im Beschleunigungsfall wird das Druckniveau der Ladeluft durch das kurzzeitige Zuschalten eines elektrisch angetriebenen Radialverdichters erhöht. Die Anordnung dieses eBoosters kann sowohl vor dem Verdichter des Turboladers als auch danach erfolgen. In beiden Fällen handelt es sich um eine 2-stufige Aufladung, die die bereits erwähnten Vorteile bezüglich Druckverhältnis und Durchsatzspanne aufweist. Durch die bereits bei geringen Motordrehzahlen erreichbare Ladedruckerhöhung sowie Erhöhung des Mitteldruck, vergleiche Abbildung 11, ist eine Verbesserung des dynamischen Fahrverhaltens möglich. Das Anfahrverhalten verbessert sich durch den schneller aufgebauten Ladedruck und dem daraus folgenden höheren Drehmoment nachhaltig.

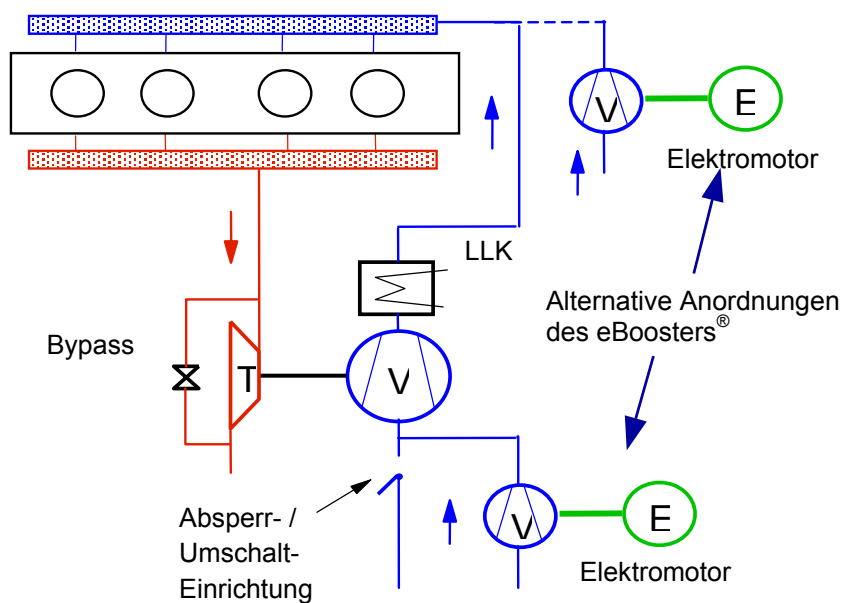


Abb. 10: Schaltbild für den elektrisch angetriebenen Strömungsverdichter (eBooster™)

Basis für die transienten Untersuchungen ist ein an stationären Motorversuchen abgeglichenes Simulationsmodell. Für die transienten Berechnungen müssen weitere Parameter wie zum Beispiel der Schwerpunkt der Verbrennung als Funktion der Last und der Drehzahl in das Modell integriert werden. Wie zuvor bereits erwähnt, beinhaltet das stationäre Modell Rohrwandtemperaturen zur Berechnung des Wärmeübergangs. Dieser Parameter hängt wie eine Vielzahl weiterer Daten von Drehzahl und Last ab und ändert sich dementsprechend bei transientem Motorbetrieb. Das

Massenträgheitsmoment der beschleunigten Turboladerteile Verdichterrad-Welle-Turbinenrad ist bei transienten Untersuchungen von großer Bedeutung und muss für die Simulation sehr genau ermittelt werden. Das Massenträgheitsmoment steigt mit größeren Laufräderdurchmessern stark an. Beim Verdichterrad des eBoosters muss ein Kompromiß zwischen hohem Druckverhältnis bei gegebener Drehzahl, was große Raddurchmesser erfordert, und dem Massenträgheitsmoment gefunden werden.

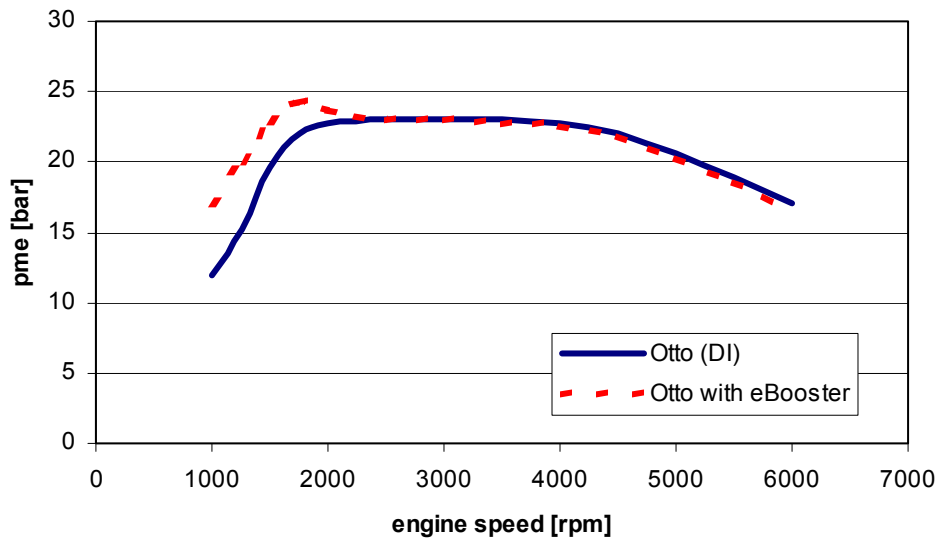


Abb. 11: Mitteldruckverlauf für Ottomotor mit und ohne eBooster

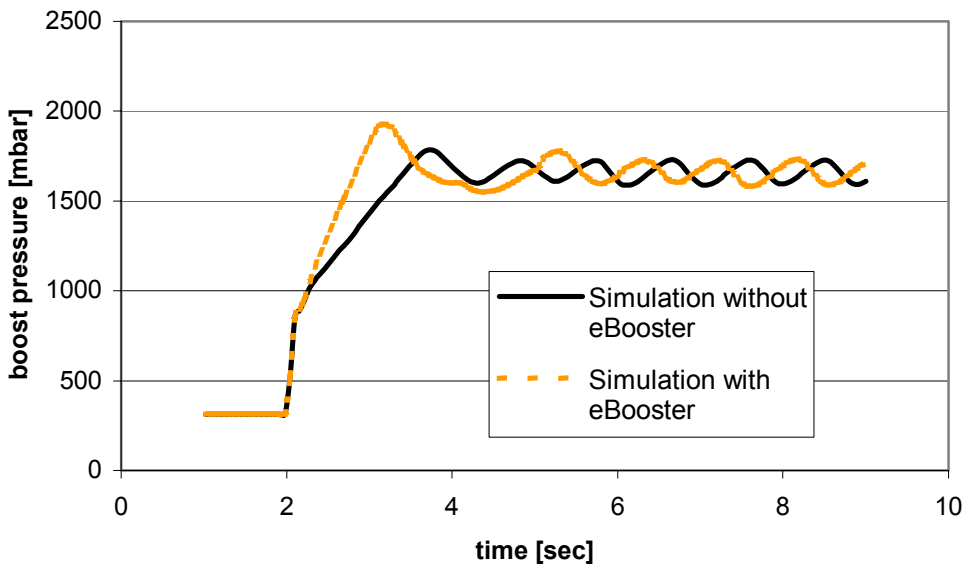


Abb. 12: Ladedruckverlauf für Lastwechsel bei 2000 U/min

Darüber hinaus ist es notwendig, die für den eBooster zur Anwendung kommenden Verdichter ihrer aerodynamischen Eigenschaften entsprechend auszulegen. Abbildung 12 zeigt für einen Lastwechsel bei 2000 U/min den Aufbau des Ladedruckes ohne und mit eBooster.

Die transiente Berechnung mit dem integrierten Modell des eBoosters zeigt ein deutlich verbessertes dynamisches Verhalten. Die Simulationsergebnisse geben die am Motorprüfstand durchgeführten Messungen sehr gut wieder. Bezüglich der Anordnung des Aufladesystems konnten für den betrachteten Fall bei der Simulation deutliche Vorteile für die Anordnung des eBoosters nach Turboladerverdichter ermittelt werden. Dieses Ergebnis zeigt deutlich den Vorteil von Simulationen, die es ermöglichen, zu einem sehr frühen Stadium bereits wichtige Erkenntnisse – in diesem Fall die optimale Anordnung des Aufladesystems – zu beurteilen.

3.3 Spezielle Anforderungen an die Otto-Aufladung

Zukünftige Ottomotoren stellen höchste Anforderungen an die thermische Belastbarkeit von Turboladern. Die Abgastemperatur am Turbineneintritt wird auf über 1000°C ansteigen. Dies resultiert aus der Entwicklung schadstoff- und verbrauchsoptimierter Brennverfahren. Als Werkstoffe für Turbinengehäuse stehen hitzebeständiger Stahlguß und hitzebeständige Stahlbleche zur Verfügung. Turbinenräder aus noch hochwertigeren Nickelbasislegierungen als bisher erfüllen diese Anforderung ebenfalls. Die Entwicklung einer Turbine mit variabler Geometrie (VTG) für Ottomotoren muss dieser Anforderung ebenfalls genügen.

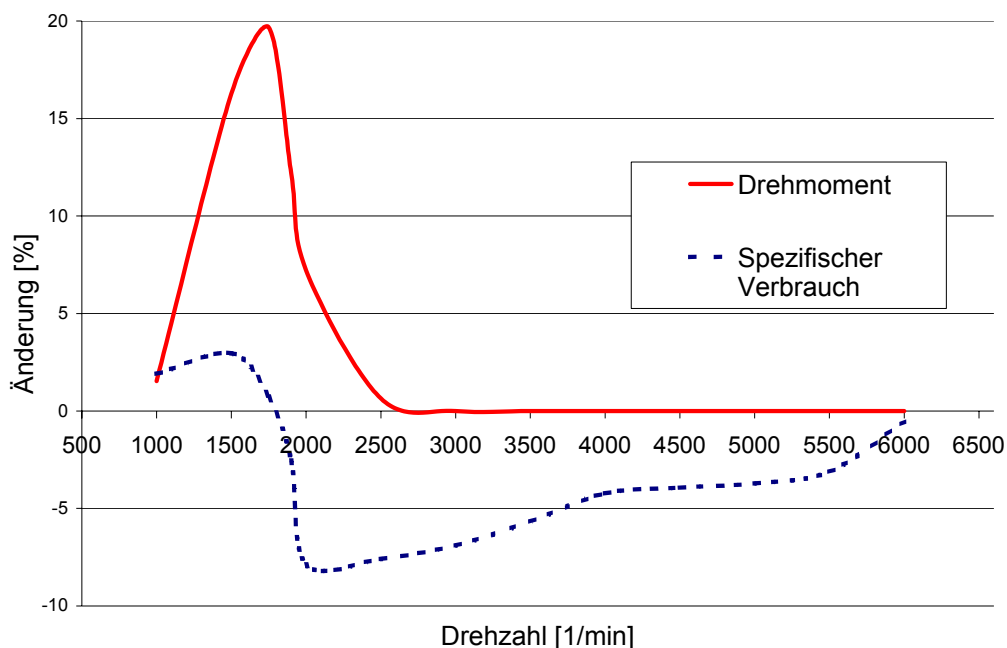


Abb. 13: Veränderung von Drehmoment und Verbrauch bei Einsatz einer VTG am Ottomotor im Vergleich zu einem Waste-Gate Abgasturbolader

Eine weitere Steigerung der Temperaturbeständigkeit des VTG-Apparates ist für den Einsatz an Ottomotoren notwendig. BWTS sieht die Möglichkeit, mit Abgasturboladern mit einer variablen Leitschaufelgeometrie die Effizienz moderner Otto-Motoren noch weiter zu steigern. Bei Motorversuchen hat sich gezeigt, dass gerade im unteren Drehzahlbereich stationäre Drehmomentsteigerungen bis zu 20% bei verbessertem Ansprechverhalten gegenüber einem Abgasturbolader mit Waste-Gate Regelung möglich sind. Abb. 13 zeigt, dass die Verbesserung des Drehmoments einen Verbrauchsnachteil von maximal 3% in diesem Bereich zur Folge hat, im höheren Drehzahlbereich entstehen Verbrauchsvorteile von bis zu 8% bei gleicher Leistung.

Der Wirkungsgradvorsprung und die Erhöhung des Motordrehmoments durch den Turbolader mit variabler Turbinengeometrie im Vergleich zum Waste-Gate Turbolader überwiegt die leichten Verbrauchsnachteile im unteren Drehzahlbereich deutlich.

Die 2-stufige Aufladung ist für den Ottomotor ebenfalls in der Erprobung. Ähnlich wie beim Dieselmotor lassen sich sehr hohe Anfahr Drehmomente darstellen.

Schlußfolgerung

Der Anteil der Dieselmotoren ist in den letzten Jahren stetig angestiegen. Heute ist fast jeder Dieselmotor abgasturboaufgeladen. Nach dem Klappenlader hat sich die Turbine mit variabler Geometrie zum Stand der Technik entwickelt. Der Motor mit VTG zeichnet sich durch ein hohes Drehmoment aus, die dieseltypische Anfahrtschwäche ist kaum noch vorhanden. Die Motoreigenschaften mit Leistungen von bis zu 60 kW / Liter und einem maximalen Drehmoment von 170 Nm /Liter werden durch die 2-stufig geregelte Aufladung noch erhöht. Beim Dieselmotor hat sich Downsizing bereits durchgesetzt.

Durch die Markteinführung der Pkw-Motoren mit Benzin-Direkteinspritzung (BDI) wird sich der Trend zu aufgeladenen Motoren auch für den Otto-Motor verstärken. Durch die Vorteile der neuen Technologie bezüglich Kraftstoffverbrauch und Motorleistung, hier ist besonders das erhöhte Anfahr Drehmoment zu erwähnen, ist auch für den Otto-Motor Downsizing zu einem Thema geworden. Durch die sehr guten dynamischen Fahreigenschaften und Kraftstoffeinsparpotentiale wird sich der aufgeladene Motor in naher Zukunft am Markt etablieren.

Literaturverzeichnis

- [1] Prevedel, K., Pinter, A., Wolkerstorfer, J., Haimann, A.; Fahrspaß trotz Hubraumverkleinerung: eine lösbare Herausforderung durch Aufladung, 8. Aufladetechnische Konferenz, Dresden, 2002
- [2] Schamel, A., Pingen, B., Limbach, S., Foulkes, D.; BDE Downsizing – Ist der Markt bereit, DI Downsizing – Is the Customer prepared, Innovative Fahrzeugantriebe, VDI-Berichte Nr.1704, 2002
- [3] Engels, B., Lucks, R., Pflüger, F.; Abgasturbolader für zukünftige Ottomotoren, 4. Symposium ‚Entwicklungstendenzen bei Ottomotoren‘, Technische Akademie Esslingen, 3.-4. Dezember 1998
- [4] Simon, V., Oberholz, G., Mayer, M.; Abgastemperatur 1050°C. Eine konstruktive Herausforderung, 7. Aufladetechnische Konferenz, Dresden, 2000
- [5] Mayer, M.; Abgasturbolader, Die Bibliothek der Technik, Band 103, 4. Auflage, Verlag Moderne Industrie, 2001

- [6] Hoecker, P., Pflüger F., Jaisle, J. W., Münz, S.; Moderne Aufladekonzepte für Pkw Dieselmotoren, 7. Aufladetechnische Konferenz, Dresden, 2000
- [7] Hoecker, P., Jaisle, J. W., Münz, S.; Der eBooster[®] – Schlüsselkomponente eines neuen Aufladesystems von BorgWarner Turbo Systems für Personenkraftwagen, 22. Internationales Wiener Motorensymposium, Band 2, Fortschrittsberichte VDI-Reihe 12, Nr. 455, 2001
- [8] Schorn, N., Fieweger, K., Paffrath, H., Schulte, H.; Potentialabschätzung von Dieselmotoren für Pkw-Dieselmotoren, 8. Aufladetechnische Konferenz, Dresden, 2002
- [9] Silvestri, J., Morel, T., Lang, O., Schernus, C., Rauscher, M.; Advanced Engine/Drivetrain/Vehicle Modelling Techniques, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Oktober 2000
- [10] Schmitt, F., Weber, M., Gabriel, H., Lingenauber, R., Schmalzl, H.-P.; Neue Erkenntnisse bei der variablen Turbinen- und Verdichtergeometrie für die Anwendung in Turboladern für Pkw Motoren, New Investigations of Variable Turbine and Compressor Geometry for Passenger Car Turbocharger Applications, 22. Internationales Wiener Motorensymposium, Band 2, Fortschrittsberichte VDI-Reihe 12, Nr. 490, 2002
- [11] Borrmann, D., Brinkmann, F., Walder, K., Pingen, B., Wojahn, J., Behrends, P.; Benzindirekteinspritzung mit Turboaufladung – ein interessantes Downsizingkonzept, Gasoline Direct Injection and Turbo Charging – a New Opportunity for Downsizing, 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Oktober 2002
- [12] Friedrich, C., Krebs, W., Quarg, J., Kapus, P.; Downsizing – ein geeigneter Ansatz zur Wirkungsgradsteigerung von Ottomotoren, Downsizing – A valid Way to more Efficiency of Passenger Car Powertrains, 22. Internationales Wiener Motorensymposium, Band 2, Fortschrittsberichte VDI-Reihe 12, Nr. 490, 2002
- [13] Habermann, K., Lang, O., Rohs, H., Rauscher, M.; Maßnahmen zur Verbesserung des Anfahrtdrehmoments bei aufgeladenen Ottomotoren, 8. Aufladetechnische Konferenz, Dresden, 2002
- [14] Sonner, M., Kuhn, M., Wurms, R., Friedrich, J.; Elektrisch unterstützte Aufladung beim Otto-Turbomotor – Chancen und Grenzen, 8. Aufladetechnische Konferenz, Dresden, 2002

BorgWarner Turbo Systems
Worldwide Headquarters GmbH
Mannheimer Strasse 88
67292 Kirchheimbolanden / Germany
Phone: ++49 (0)6352 75 33 0
Fax: ++49 (0)6352 75 33 99

3K-Warner Turbosystems GmbH
Mannheimer Strasse 85/87
67292 Kirchheimbolanden / Germany
Phone: ++49 (0)6352 403 0
Fax: ++49 (0)6352 403 1866

BorgWarner Turbo Systems Ltd.
Euroway Industrial Estate
Bradford BD4 6SE
West Yorkshire / UK
Phone: ++44 1274 684 915
Fax: ++44 1274 689 671

BorgWarner Turbo Systems
PO Box 15075
Asheville, NC 28813/USA
Phone: 001 828 684 4000
Fax: 001 828 684 4114

BorgWarner Automotive Brasil Ltda.
Estrada da Rhodia Km 15
P.O. Box 6540
13084-970 Campinas-SP / Brasil
Phone: ++55 19 3787 5700
Fax: ++55 19 3787 5701

Hitachi Warner Turbo Systems Ltd.
3085-5 Higashi Ishikawa Saikouchi, Hitachinaka-shi
Ibaraki-ken
312-0052, Japan
Phone: +81 (0) 29-276-9388
Fax: +81 (0) 29-276-9397

www.turbos.bwauto.com

