

AUTOREN



Dipl.-Ing. Jan Linsel ist Entwicklungsingenieur Emissionssysteme Antriebsstrang in der Abteilung Forschung und Prüfung bei Ford of Europe in Köln.



Dipl.-Ing. Stephan Wanner ist Leiter Vorentwicklung Systemtechnik bei der Handtmann Systemtechnik GmbH in Biberach/Riß.

Der Handtmann-Spirallader des Typs HSLn 580 verfügt über weniger als 20 % des üblichen Trägheitsmoments eines vergleichbaren mechanischen Aufladesystems. Im Tandem mit einem konventionellen Turbolader am Ford-1,0-I-EcoBoost-Motor verbessern sich Fahrbarkeit und Drehmomententfaltung signifikant.

## **EINLEITUNG**

Downsizing ist ein wirksames und bewährtes Konzept, um den Kraftstoffverbrauch von Verbrennungsmotoren zu reduzieren. Diese Motoren bieten Leistungswerte äquivalent zu größerem Hubraum und verbrauchen speziell im Teillastbetrieb weniger Kraftstoff. Wesentliche Voraussetzung hierfür ist die Aufladung.

Bei der heute überwiegend verwendeten einstufigen Abgasturboaufladung kommt es zum Zielkonflikt zwischen erreichbarer Leistung, Verbrauch und Anfahrverhalten. Das beim Anfahrvorgang spontan verfügbare Drehmoment reduziert sich proportional zur Hubvolumenabsenkung, dazu kommt das typische verzögerte dynamische Ansprechen

des Turboladers. Damit wird das Anfahrverhalten zu einem der am wesentlichsten einschränkenden Kriterien bei der Auslegung eines Verbrennungsmotors.

Abhilfe schafft hier eine mehrstufige Aufladung, wie zum Beispiel die Kombination von mechanischer plus Turbo-Aufladung. Diese bietet damit die Möglichkeit, durch gesteigerte Leistung den Grad des Downsizing weiter anzuheben.

Das nachstehend beschriebene Projekt untersucht die zweistufige Aufladung am Ford-EcoBoost-1,0-l-Motor mit einem mechanischen Spirallader HSLn der Firma Handtmann Systemtechnik. Der Dreizylinder-Turbomotor leistet serienmäßig 92 kW. Ziel war, eine Leistungserhöhung auf 110 kW bei gleichzeitiger Verbesserung von Ansprechverhalten und stationärem Drehmoment darzustellen.

## DAS MECHANISCHE AUFLADESYSTEM HSLN 580

Der Handtmann-Spirallader, genannt HSLn-Lader, basiert als umfassende Neuentwicklung auf dem Prinzip früherer G-Lader-Generationen. Die bekannten Probleme der ersten Spirallader-Generation aus den 1980er-Jahren konnten durch Detail-Optimierung überwunden werden. Der neue Handtmann-Lader mit 763 cm<sup>3</sup> Kammervolumen wurde bereits umfassend vorgestellt [1]. Als dominanter Vorteil zeigte sich ein potenzieller Drehmoment-Zuwachs von 30 % im unteren Drehzahlbereich. Das beim Zuschalten des Laders zusätzliche Trägheitsmoment beträgt dabei nur etwa 20 % vergleichbarer mechanischer Lader. Das öffnet die Tür für geringere Riemenspannung, damit reduzierte Verluste im Riementrieb und eine höhere Riemenlebensdauer.

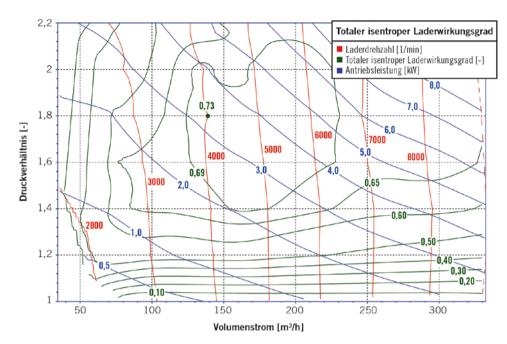
Für die Anwendung am Ford-1,0-l-EcoBoost wurde gegenüber dem Spirallader der ersten Generation das Kammervolumen auf 580 cm³ reduziert, wodurch sich die Trägheit weiter verringert. Zugleich bewirkt der herabgesetzte Verdrängerhub im Lader eine geringere Gleitgeschwindigkeit der Dichtleisten, was sich positiv auf Reibung und Verschleiß auswirkt.

Zudem lässt sich der kompakte Lader, dessen Abmessungen einem konventionellen Abgasturbolader entsprechen, im Motorraum moderner Klein- und Mittelklassefahrzeuge wesentlich besser unterbringen.

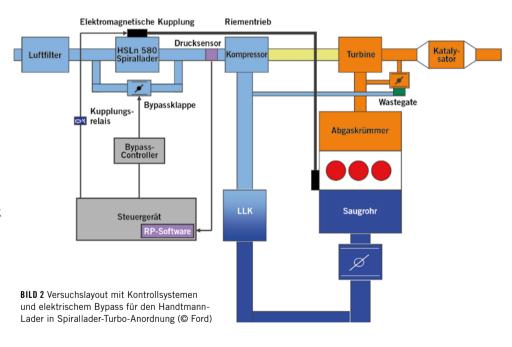
Der Vorteil dieser zweiten HSLn-580-Generation besteht außerdem in einer weiteren bedeutenden Optimierung des Gesamtwirkungsgrads. Der liegt nun um 5 % höher und erstreckt sich zugleich über einen wesentlich weiteren Bereich des Kennfelds, BILD 1. Dieser neue Lader wurde nun in Kombination mit einem Abgasturbolader am Ford-EcoBoost-1,0-l-Dreizylinder in zweistufiger Anordnung erprobt.

## TESTAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG

Als Versuchsträger wurde der Ford-EcoBoost-1,0-l-Motor gewählt. Der Spirallader ist im Luftpfad vor dem Kompressor des Turboladers angeordnet und mit einem elektrisch stufenlos verstellbaren Bypass versehen, der den Druck regelt und Schleppverluste vermeidet, BILD 2. Diese Anordnung bietet speziell im Hin-



**BILD 1** Wirkungsgradkennfeld des HSLn 580 in Bezug auf die Laderdrehzahl (rot) und das Druckverhältnis (blau): Der Handtmann-Lader bietet in weiten Bereichen einen Wirkungsgrad von über 60 % und damit 100 % mehr als bisher für einen Spirallader üblich (© Handtmann)



blick auf die Optimierung des Ansprechverhaltens den größten Nutzen, da sie einen besonders schnellen Ladedruckaufbau unterstützt [2].

Der Dreizylindermotor wurde durch verschiedene Maßnahmen an den erwarteten Anstieg der Mitteldrücke angepasst. Dazu gehörten ein abgesenktes Verdichtungsverhältnis sowie Kühlkanalkolben mit speziell angepassten Kolbenspritzdüsen für

eine verstärkte Kühlung der Kolbenböden. Das empfahl sich deshalb, weil für diese Anordnung mit zweistufiger Aufladung ein größerer Turbolader ins Spiel kam, um die Nennleistung des Motors zu steigern. Im Nachfolgenden gilt das Augenmerk aber einem verbesserten Drehmomentverhalten im unteren Drehzahlbereich.

Der einstufige Riemenantrieb des HSLn 580 erfolgt über eine zusätzliche

**MTZ** 1112015 76. Jahrgang 41

Riemenscheibe am freien Kurbelwellenende. Eine in die Nabe der Laderwelle integrierte elektromechanische Kupplung realisiert die bedarfsabhängige Zuschaltung des mechanischen Laders. Diese Anordnung führt zwangsläufig zu einem stets mitlaufenden Riemen, inklusive der damit verbundenen Schleppverluste. Eine Verlagerung der Kupplung in die Riemenscheibe an der Kurbelwelle bietet hier eine denkbare Alternative mit Verbesserungspotenzial.

Die Regelung des Systems wurde mittels in die vorhandene Softwarestruktur integrierten, als Add-On programmierten zusätzlichen Rapid-Prototype-Software-Paketen umgesetzt. Ein zusätzlicher Drucksensor zwischen Spirallader-Ausgang und Turboladereingang liefert das Führungssignal für die bedarfsabhängige Druckregelung im zweistufigen Betrieb.

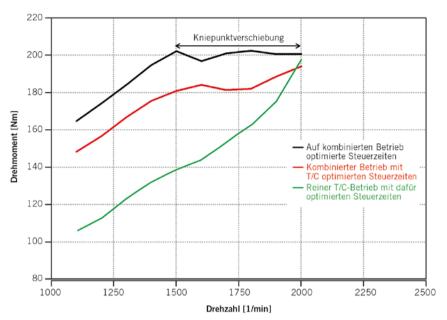
Alle Prüfstandstests wurden im Ford-Entwicklungszentrum in Köln-Merkenich ausgeführt. Neben stationären Messungen lag besonderes Augenmerk darauf, das dynamische Systemverhalten bei Lastsprüngen zu ermitteln.

## TESTERGEBNISSE – STATIONÄRE VOLLLAST

Für einstufig aufgeladene Turbomotoren ist die Strategie, mit großen Ventilüberschneidungen insbesondere bei niedrigen Drehzahlen hohe Drehmomente zu erzielen, vorteilhaft. Sie führt jedoch in diesem Fall nicht zum besten Ergebnis. Die rote Kurve zeigt den Drehmomentverlauf bei maximaler Luftmenge. Diese hilft zwar dabei, die Betriebspunkte in den optimalen Bereich des Turboladerkennfelds zu verschieben. Die notwendige Luftmasse muss allerdings durch mechanische Kurbelwellen-Leistung bereitgestellt werden.

Es stellte sich als effektiver heraus, die Steuerzeiten für den kombinierten Betrieb beider Lader zwischen 1000 und 2000/min so zu wählen, dass die geförderte Luft mittels kleiner Ventilüberschneidung weitestgehend im Brennraum eingeschlossen wird. Damit sinkt die notwendige Antriebsleistung des mechanischen Aufladesystems und die Drehmomentwerte entsprechen der füllig verlaufenden Kurve in schwarz, BILD 3.

Ein Vorteil der Steuerzeiten-Variation zugunsten geringer Ventilüberschneidung und der damit zusammenhängenden Vermeidung durchgespülter Luft



**BILD 3** Kennlinien für die stationäre Volllast im unteren Drehzahlbereich: Hohe Drehmomente für spontanes Ansprechen werden rund 500/min niedriger erreicht als beim Betrieb mit Turbolader allein (© Ford)

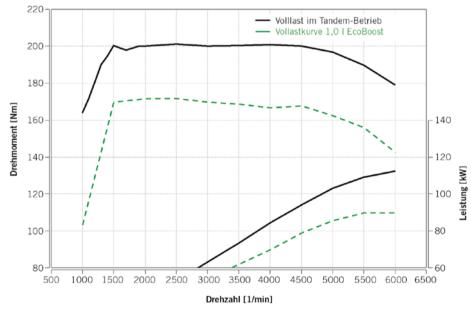


BILD 4 Kennlinien für die stationäre Volllast (© Ford)

stellt die Möglichkeit zum stöchiometrischen Betrieb des Motors auch bei hohen Lasten im unteren Drehzahlbereich dar. Das unterstützt, solche Antriebssysteme kompromisslos für Märkte anzuwenden, in denen Magerbetrieb unzulässig ist. Auch im Hinblick darauf, die künftige europäische Emissionsgesetzgebung zu erfüllen, ist es zu bevorzugen.

Das minimierte mechanisch geförderte Luftvolumen gibt auch die Regelungsstrategie vor. Ziel muss die mög-

lichst hohe Ausnutzung des Turboladers sein. Das heißt, dass im kombinierten Betrieb die Ladedruckregelung vorrangig über die Bypassklappen-Steuerung erfolgt. Das Wastegate bleibt in diesem Fall geschlossen, bis der mechanische Lader auskuppelt.

Die grüne Kurve zeigt das erzielbare Drehmoment mit Turbolader-optimierten Steuerzeiten ohne Unterstützung durch den mechanischen Lader, **BILD 3**. Es offenbart sich, dass eine einstufig ausgeführte Leistungssteigerung den sogenannten Kniepunkt, sprich die Drehzahl, bei der erstmals das maximale Drehmoment zur Verfügung steht, um circa 500/min zu höheren Drehzahlen verschoben hätte. Den vollständigen Drehmomentverlauf im Vergleich zum serienmäßigen 1,0-l-EcoBoost zeigt BILD 4.

Die Möglichkeit, im gekoppelten Einsatz beider Lader den Turbolader in seiner Wirkung durch den Spirallader-Einsatz zu unterstützen, ist im Bereich von 1000 bis 2000/min von klaren Vorteilen gekennzeichnet. Oberhalb von 2000/min gibt es im kombinierten Stationärbetrieb keinen messbaren Nutzen mehr. Zur besseren Motordynamik ist ein zeitlich begrenzt zugeschalteter mechanischer Lader bei höheren Drehzahlen dennoch sehr sinnvoll.

## DYNAMISCHES ANSPRECHVERHALTEN

Ein gutes Maß, um die Systemdynamik zu bewerten, ist die Zeit, die benötigt wird, um bei konstanter Drehzahl von einem Punkt definiert niedriger Motorlast (Mitteldruck=100 kPa) auf 90 % des maximal erzielbaren Stationärdrehmoments zu kommen. Das Ergebnis einer solchen Untersuchung bei 1300/min als Vergleich zwischen dem Serienmotor und der zweistufig aufgeladenen Variante zeigt BILD 5. Hierbei muss beachtet werden, dass der Serienmotor im Turbobetrieb ein niedrigeres Stationärdrehmoment liefert. Um 90 % dieses Drehmoments zu erzeugen, benötigt die zweistufig aufgeladene Variante etwa 3,0 s weniger (1,0 statt 4,0 s). Weitere 0,5 s danach, also nur 1,5 s nach dem Lastsprung, steht bereits das um 20 Nm höhere Moment im kombinierten Betrieb zur Verfügung. Die entsprechenden Mitteldruckkurven zeigt das Diagramm oben links, bei dem die früher einsetzende und zugleich höhere Kraftentfaltung (rote Linie) klar hervortritt.

Ab 1500/min erreicht auch der Serienmotor im Overboost-Betrieb das maximale Drehmoment von 200 Nm unter Volllast. Allein der dynamische Vorteil der zweistufigen Aufladung beträgt auch hier bemerkenswerte 1,5 s. Das verbessert die Fahrbarkeit durch die zweistufige Aufladung noch einmal signifikant.

Der spontane Ladedruckaufbau unmittelbar hinter dem Spirallader mit seinem typischerweise beinahe senkrecht verlaufenden Druckanstieg, wird im unten rechts stehenden Diagramm deutlich, **BILD 5**. Das darüber liegende Diagramm beschreibt den Druckaufbau hinter den beiden Ladern im Saugrohr für die verschiedenen Varianten.

Im ersten Anstieg der Mitteldruckkurve für den zweistufig absolvierten Lastsprung lässt sich außerdem das um das Antriebsmoment für den mechanischen Lader verringerte Saugerdrehmoment erkennen. Dieser systembedingte Nachteil spielt allerdings nur in der ersten Phase des Drehmomentaufbaus eine Rolle.

### **SYSTEMEFFIZIENZ**

Der Antrieb des HSLn 580 erfolgte für diese Versuchsreihe über eine zweite

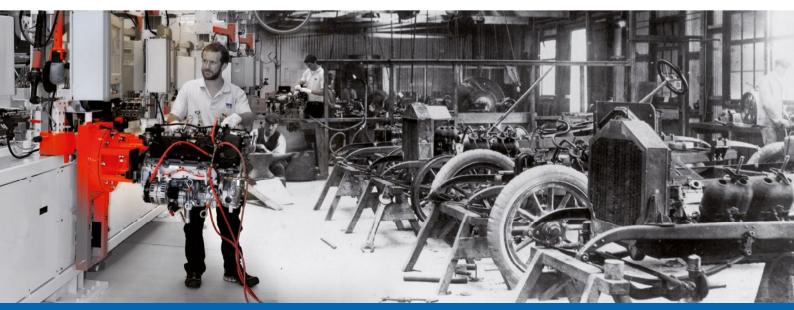
## **Innovation & Technology**

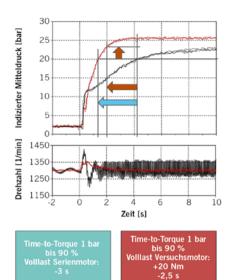
## 100 Jahre Partner der Automobilindustrie

Entwicklung von Motor-, Getriebe- und Fahrzeugsystemen sowie Hybrid- und Elektroantrieben

Prototypen- und Kleinserienfertigung von Hochleistungsprodukten Technische Beratung – Strategische Beratung – Umweltberatung







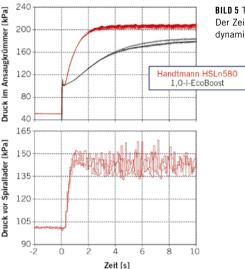


BILD 5 Time-to-Torque-Messungen bei 1300/min: Der Zeitvorteil mit Spirallader beträgt im dynamischen Bereich bis zu 3,0 s (© Ford)

Riemenebene und eine in den Lader integrierte Kupplung. Nachteil dieses Aufbaus sind die stetigen Reibungsverluste im Riementrieb, die auch bei ausgekuppeltem Lader anliegen.

Das im vorliegenden Versuch reduzierte Verdichtungsverhältnis des Motors verringert vor allem den Teillastwirkungsgrad zusätzlich. Es wurde trotzdem gewählt, um die Klopfempfindlichkeit speziell bei Hochdruck-Aufladung zu mindern. Es unterstützt außerdem die Nutzung nieder-oktaniger Kraftstoffe, dazu den Einsatz in größerer Höhe und bei höheren Umgebungstemperaturen.

Die Reibungsverluste bei verschiedenen Drehzahlen sind erkennbar, **BILD 6**.

Die höhere Reibung durch den Riementrieb zeigt sich im Unterschied der grünen und der blauen Linie. Der Abstand zwischen der grauen und der blauen Kurve gibt Aufschluss über die Antriebsleistung des mechanischen Laders. Dagegen sind Reibungsverluste durch die höhere innere Motorleistung vernachlässigbar.

## AUSBLICK UND WEITERENTWICKLUNG

Die Erprobung eines zweistufigen Aufladesystems, bestehend aus einem Handtmann HSLn 580 Spirallader sowie einem Turbolader am Ford-1,0-l-EcoBoost-Motor zeigte das hohe Potenzial, das dieses Sys-

tem hinsichtlich verbesserter Motordynamik bieten kann. Es zeigten sich aber auch weitere Möglichkeiten zur Systemoptimierung.

So würde grundsätzlich ein etwa halb so großes Kammervolumen ausreichen, um die notwendige Luftmenge entsprechend der Zieldrehmomentkurve bei verbesserter Ausnutzung des mechanischen Laders zur Verfügung zu stellen, **BILD 7**.

Der kleinere Lader kann aufgrund eines niedrigeren Trägheitsmoments die Systemdynamik nochmals verbessern. Eine Verschiebung der Kupplung vom Lader zur Kurbelwellenriemenscheibe hilft sowohl die Riementriebs-Verluste zu minimieren, als auch das vordere Stützlager des Laders zu entlasten. Im Hinblick auf eine notwendige höhere Übersetzung zum Antrieb eines kleineren Laders ist dieser Punkt auch unter Lebensdauer-Gesichtspunkten vorteilhaft. Ein minimales Totvolumen der Luftführung trägt zur weiteren Dynamiksteigerung bei.

Die besondere Eignung des Spiralladers für einen elektrischen Antrieb im 12- oder 48-V-System wurde schon festgestellt [3]. Ein solches Aggregat befindet sich bereits in der Erprobung. Die Ergebnisse werden in einem gesonderten Bericht nachgereicht.

Beim geplanten Einsatz des zweiten Laders mittels elektrischen Antriebs entsteht eine höhere System-Komplexität. So müssen die Anforderungen an die elektrische Umgebung erarbeitet werden, ohne den guten Gesamtwirkungsgrad aus den Augen zu verlieren. Mögliche Beschränkungen durch aktuell variieren-

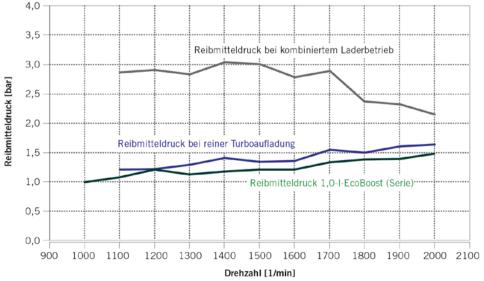
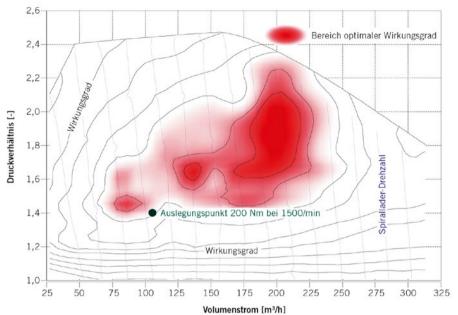


BILD 6 Messvergleich der Reibleistung im Betrieb mit Serien-Turbolader und im Tandem-Betrieb (@ Ford)



**BILD 7** Der Auslegungspunkt im Kennfeld des Spiralladers HSLn 580 weist darauf hin, dass der Lader im vorliegenden Muster noch nicht optimal ausgenutzt wurde (© Ford)

den Batterieladezustand, Zyklen-Häufigkeit und Umgebungstemperaturen müssen dabei gleichfalls berücksichtigt und bewertet werden. Der Aufwand für das eBoost-System erscheint trotzdem sinnvoll, nachdem durch den Wegfall des Riementriebs weitere Vorteile entstehen. Die im vorliegenden Bericht erwähnte reduzierte Saugervolllast im Lastsprung würde ebenfalls entfallen. Es wird zudem möglich, den Lader frei im Motorraum unterzubringen. Eine Regelung des Laders unabhängig von der Motordrehzahl kann helfen, Bypass-Verluste zu eliminieren und die ladereigene Charakteristik besser zu nutzen.

#### LITERATURHINWEISE

[1] Licht, J.; Wanner, S.; Maiwald, O.; Keuler, J.: Neue Spirallader-Generation – Mehr Leistung bei weniger Verbrauch. In: MTZ 73 (2012), Nr. 10 [2] Wetzel, P.; Trudeau, J.: Neuer Kompressor für Downsizingmotoren. In: MTZ 74 (2013), Nr. 2 [3] Martin, S.: Potenziale elektrischer Zusatzaufladung mit neuen Regelungskonzepten. Tagung Internationaler Motorenkongress, Baden-Baden, 2014



### DOWNLOAD DES BEITRAGS

www.springerprofessional.de/MTZ



## READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

order your test issue now: springervieweg-service@springer.com

# Wir machen unsere **Kunden** zur Nr. 1 im Honen.





Mit dem Wunsch nach weiterer Verbrauchsreduzierung steigen auch die Erwartungen an die Endbearbeitung. Wir unterstützen Sie im Kampf um jedes Gramm CO<sub>2</sub>-Ersparnis. Z.B. mit Bearbeitungslösungen für reibungsgünstige neue Werkstoffe, Oberflächen und Bohrungsformen. Unsere Innovationen eröffnen Ihnen ganz neue konstruktive Freiheiten.

Von Anfang an stellen wir einen hohen Anspruch an alles, was wir in die Hand nehmen. So verfügen wir über eine eigene Entwicklungsabteilung mit Werkstofflabor und begleiten unsere Auftraggeber von der Laufbuchse eines Kleinstmotors bis zum kompletten Schiffsdiesel. Wir übernehmen Verantwortung vom Prototyp bis zur Serienfertigung.

Das bedeutet ganz konkret: Verantwortungsvolle Beratung, präzise Machbarkeitsprüfungen, maßgeschneiderte Honwerkzeuge, Vor-, Klein- und Serienfertigung, Technologietransfer und kontinuierliche Linienbetreuung.

**ELGAN GmbH & Co. KG** www.elgan.de | Tel. +49 7022 605354

MTZ 1112015 76. Jahrgang 45