

VERFASST VON



**Anja Fink, M. Sc.**  
ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Fahrzeugantriebe (FZA) der Technischen Universität Berlin.



**Prof. Dr.-Ing. Maximilian Brauer**  
ist Leiter des Fachgebiets Fahrzeugantriebe (FZA) der Technischen Universität Berlin.



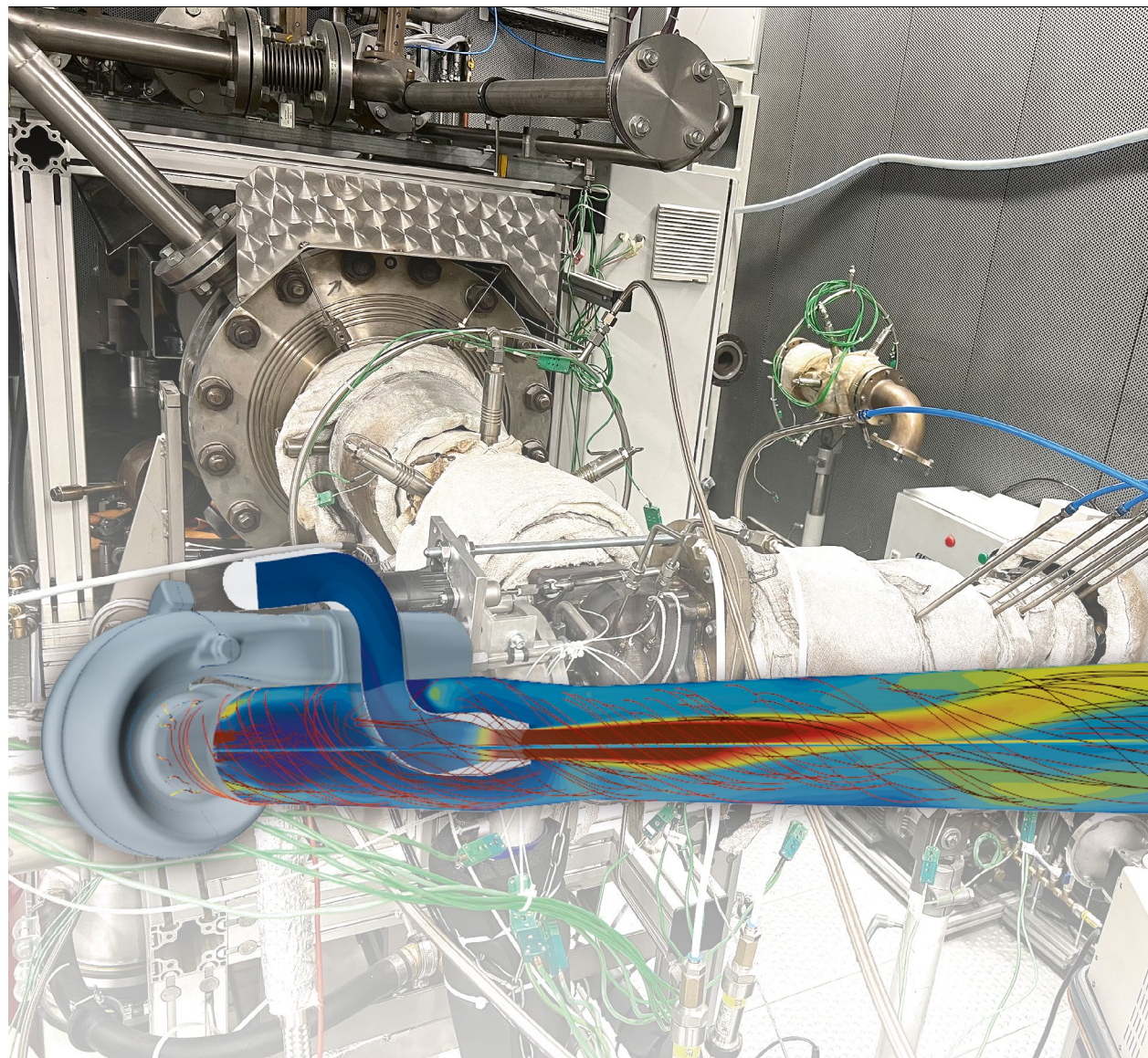
**Tobias Tietz, M. Sc.**  
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) der RWTH Aachen University.



**Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger**  
ist Leiter des Lehrstuhls für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) der RWTH Aachen University.

## Potenzialanalyse von Abgasturboladern mit Ejektorbypass

Die Entwicklung wirkungsgradoptimaler Verbrennungsmotoren geht mit steigenden Anforderungen an das Aufladesystem einher. Ein Technologiebaustein kann dabei ein Abgasturbolader sein, dessen Bypass als Ejektor ausgeführt wird. Dieser kann eine robuste und kostengünstige Alternative zur variablen Turbinengeometrie darstellen und Effizienzvorteile gegenüber der Wastegateregulierung bieten. Im Rahmen eines FVV-Forschungsprojekts (Nr. 1450) wurden an der RWTH Aachen University und der Technischen Universität Berlin experimentelle und simulative Untersuchungen der Ejektor-technologie als alternative Bypassstrategie durchgeführt.



1	MOTIVATION
2	GRUNDLAGENUNTERSUCHUNGEN
3	PRÄDIKTIVE MODELLIERUNG VON EJEKTOREN IN GT-POWER
4	POTENZIALANALYSE FÜR VERSCHIEDENE FAHRZEUGANWENDUNGEN
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

## 1 MOTIVATION

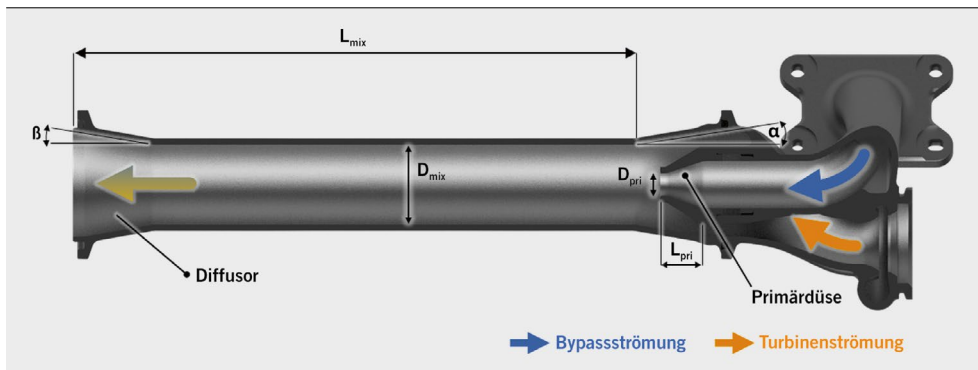
Bei der konventionellen Abgasturbolader(ATL)-Regelung mit Wastegate verbleibt die im Bypassmassenstrom enthaltene Abgasenergie ungenutzt. Im Gegensatz dazu wird die Bypassströmung bei einem Ejektorbypass-ATL, **BILD 1**, in einer konvergenten Düse beschleunigt. Der geringe Druck stromab des Düsenaustritts erzeugt eine Sogwirkung auf die Strömung hinter dem Turbinenrad. Das führt an dieser Position zu einer Druckabsenkung, was in der Folge auch den Druck stromaufwärts der Turbine reduziert. Dieser Effekt kann im Verbund mit einem Verbrennungsmotor zur Verringerung der Ladungswechselarbeit ( $p_{mi, LW}$ ) genutzt werden.

Am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) der RWTH Aachen University wurden umfassende Untersuchungen mittels 3-D-Simulationen (Computational Fluid Dynamics, CFD) durchgeführt, um die internen Strömungsvorgänge des Ejektors zu analysieren und entscheidende Designparameter zu bestimmen. Die eingesetzten Modelle wurden durch Messdaten vom Heißgasprüfstand validiert. Am Fachgebiet Fahrzeugantriebe (FZA) der Technischen Universität Berlin wurde auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse eine Potenzialanalyse für

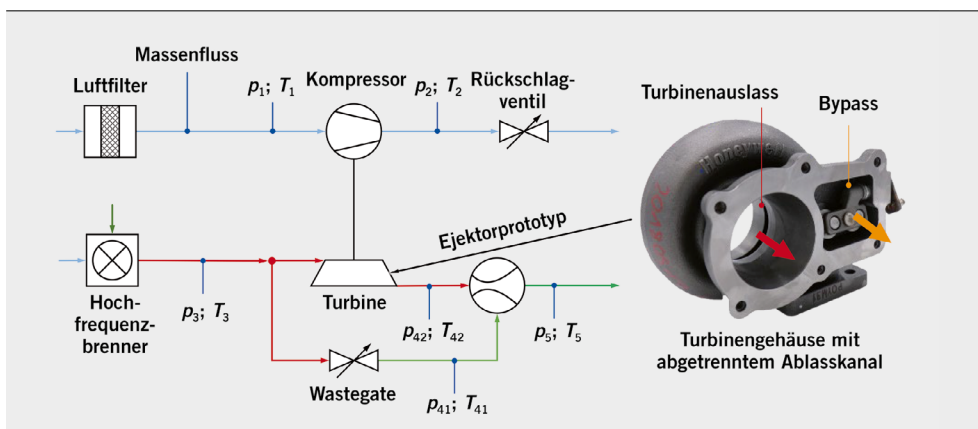
verschiedene Fahrzeuganwendungen durchgeführt. Hierzu entstand ein prädiktives 0-D-Ejektormodell, das in der Simulationsumgebung GT-Power verwendet und mit verschiedenen Motormodellen gekoppelt werden kann.

## 2 GRUNDLAGENUNTERSUCHUNGEN

Für die Ejektorauslegung wurden zunächst unterschiedliche Düsendesigns miteinander verglichen (konvergent versus konvergent/divergent (Lavaldüse); zentral versus Ringspalt). Für die Untersuchungen wurde eine konvergente zentrale Düse herangezogen. Im Rahmen des Projekts wurde eine Methode entwickelt, die mithilfe einer neu definierten Kennzahl für die Ejektoreffizienz zur Optimierung des Ejektordesigns genutzt werden kann. Die Ejektoreffizienz wird als Quotient der Leistungsterme der isentropen Verdichtung des Turbinenmassenstroms und der isentropen Expansion des Bypassmassenstroms beschrieben. Die Kennzahl stellt damit die Güte des Impulsaustauschs dar. Die Optimierung umfasste sechs abgeleitete Designparameter, die auf geometrischen Zusammenhängen des Ejektorsystems basieren. Hierbei wurde das Ziel verfolgt, die Anzahl der Parameter zu reduzieren. So konnten anhand von circa 8000 Simulationen vielversprechende Designs definiert werden. Es wurden zwei Düsen mit unterschiedlichem Durchmesser  $D_{pri}$  sowie Mischrohre mit verschiedenen Längen  $L_{mix}$  und Durchmessern  $D_{mix}$  gefertigt. Diese wurden am Heißgasprüfstand mit und ohne Turbolader getestet. Das Konzept des Prüfstandaufbaus ist in **BILD 2** dargestellt. Um die Leistungsfähigkeit des Ejektors zu bewerten, wurde die Druckabsenkung hinter der Turbine betrachtet: Sie nimmt bei reduziertem Düsendurchmesser zu, was auf die stär-



**BILD 1** Aufbau eines Ejektorbypass-ATLs (© TME | FZA)



**BILD 2** Konzept des Versuchsaufbaus mit Turbolader und Messstellen für Druckniveaus  $p_n$  und Temperaturen  $T_n$  (© TME | FZA)

kere Beschleunigung des Bypassmassenstroms zurückzuführen ist. Unter den gegebenen Randbedingungen konnte hingegen kein Einfluss der Mischrohrlänge ( $L_{mix} = 150$  bis  $300$  mm) nachgewiesen werden. Des Weiteren nimmt die erzielte Druckabsenkung mit einer Erhöhung der Bypassrate zu.

Weiterführende CFD-Untersuchungen zeigten, dass die Intensität des Dralls, der durch die Turbine verursacht wird, ebenfalls eine Auswirkung auf den Ejektoreffekt hat. **BILD 3** stellt die prozentuale Druckabsenkung hinter der Turbine (relativ zu einer Bypassrate von 0 %) in Abhängigkeit des Gesamtmassenstroms  $\dot{m}_{gesamt}$  dar. Mit steigendem Drall nimmt der Impulsaustausch zwischen Turbinen- und Bypassstrom zu, was sich positiv auf den Ejektoreffekt auswirkt. Das wird anhand des Gesamtmassenstroms von  $\dot{m}_{gesamt} = 0,258$  kg/s (rotes Dreieck) ersichtlich. Hierbei ist sowohl der Turbinenmassenstrom als auch die Bypassrate konstant, wodurch die Drehzahl die einzige Variable ist. Bei Erhöhung der Turboladerdrehzahl in diesem Betriebspunkt von  $n = 75.200$  auf  $100.200$ /min steigt der Ejektoreffekt von  $4,9$  auf  $11,3$  % an. Das bedeutet, dass eine höhere Turbinendrehzahl mit einer höheren Druckabsenkung korreliert, was auf die bessere Durchmischung zurückzuführen ist. Des Weiteren hat  $\dot{m}_{gesamt}$  keinen signifikanten Einfluss auf den Ejektoreffekt. Lediglich die Bypassrate (Verhältnis aus Bypassmassenstrom und Turbinenmassenstrom) übt einen Einfluss aus. Das konnte auch bei den experimentellen Untersuchungen beobachtet werden.

### 3 PRÄDIKTIVE MODELLIERUNG VON EJEKTOREN IN GT-POWER

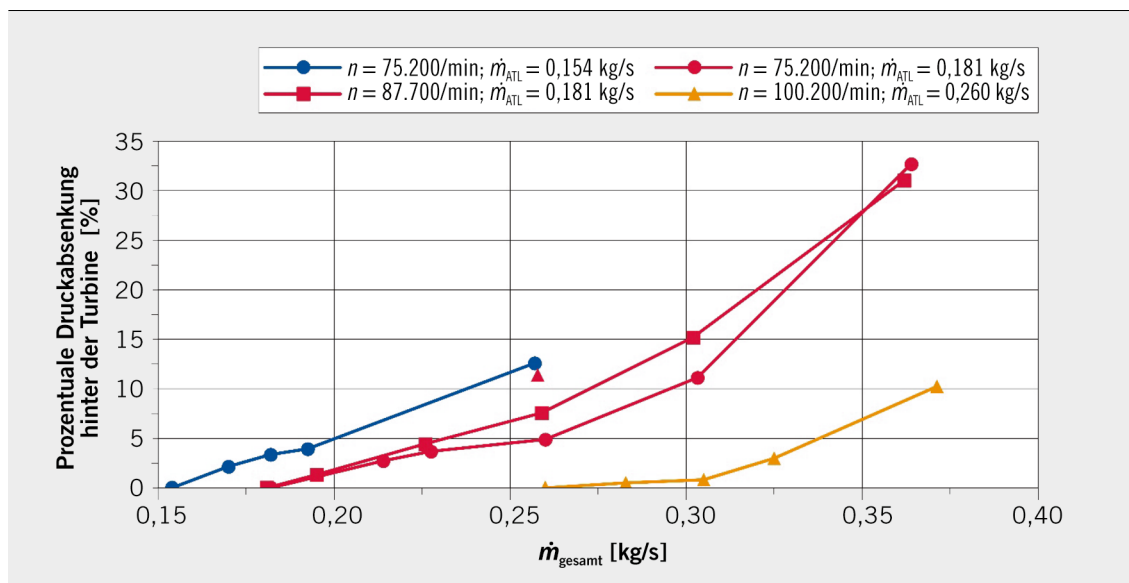
Für das Betriebsverhalten des Ejektorbypass-ATLs wurde ein prädiktives mathematisches Modell erstellt. Es wurde in eine Python-Funktion implementiert und konnte damit mit der Simulationsumgebung GT-Power gekoppelt werden. Die Daten für die Modellableitung wurden durch 3-D-CFD-Simulationen generiert. Mithilfe der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) wurde zunächst ein Simulationsplan erstellt, der die relevanten

Randbedingungen berücksichtigt, mit denen der Ejektor im Verbund mit dem Motor und dem Turbolader beaufschlagt wird. Des Weiteren beinhaltet der Simulationsplan die in **BILD 1** dargestellten geometrischen Parameter, die für die Designoptimierung in GT-Power variabel sein sollen. Das Simulationsmodell, das am Fachgebiet Fahrzeugantriebe erstellt wurde, konnte zuvor erfolgreich mit den Messdaten des TME validiert werden. Basierend auf den Ergebnissen dieser Simulationskampagne wurde das Modell mithilfe der Gauß-Prozessregression abgeleitet. Um das Modell für verschiedene Fahrzeuganwendungen nutzen zu können, wurden die Eingangsgrößen so definiert, dass eine Skalierung der Geometrie in GT-Power möglich ist. Als Ausgangsgröße liefert das Modell den Druck stromabwärts der Turbine, der in der Simulationsumgebung vereinfachend über eine Pumpe beeinflusst und eingeregelt wird. Die Modellierung des Ejektorbypass-ATLs basiert auf der Annahme einer variablen Primärdüse, deren Austrittsquerschnitt je nach Ladedruckanforderung angepasst werden kann.

### 4 POTENZIALANALYSE FÜR VERSCHIEDENE FAHRZEUGANWENDUNGEN

Für die Untersuchung der Ejektorbypass-Technologie für die otmotorische Pkw-Anwendung konnte auf ein GT-Power-Modell für einen Vierzylindermotor mit  $110$  kW und  $1,4$  l Hubraum zurückgegriffen werden. Der einstufige Wastegate-ATL wurde durch das Ejektorbypass-ATL-Modell ersetzt. Zunächst erfolgte die Optimierung der Ejektorgeometrie unter anderem für einen Betriebspunkt nahe der Nennleistung. Aufgrund der hohen Bypassraten ist hier mit dem größten Optimierungspotenzial zu rechnen. Um den zusätzlichen Bauraumbedarf sowie die Nachteile für die Abgasnachbehandlung durch zunehmende Wärmeverluste zu begrenzen, wurde die Mischstreckenlänge dabei auf  $200$  mm limitiert. Das optimierte Ejektor-design wurde für eine kennfeldweite Potenzialanalyse gewählt.

**BILD 4** zeigt die Ergebnisse der Simulation des Pkw-Ottomotors mit Ejektorbypass-ATL. Für jede dargestellte Größe wurden Differenzkennfelder (Ejektordesign – Wastegatedesign) erstellt. Die



**BILD 3** Prozentuale Druckabsenkung hinter der Turbine in Abhängigkeit von  $\dot{m}_{gesamt}$  für unterschiedliche Drehzahlen und Bypassraten unterschiedlicher Massenströme ( $\dot{m}_{ATL}$ ) © TME | FZA

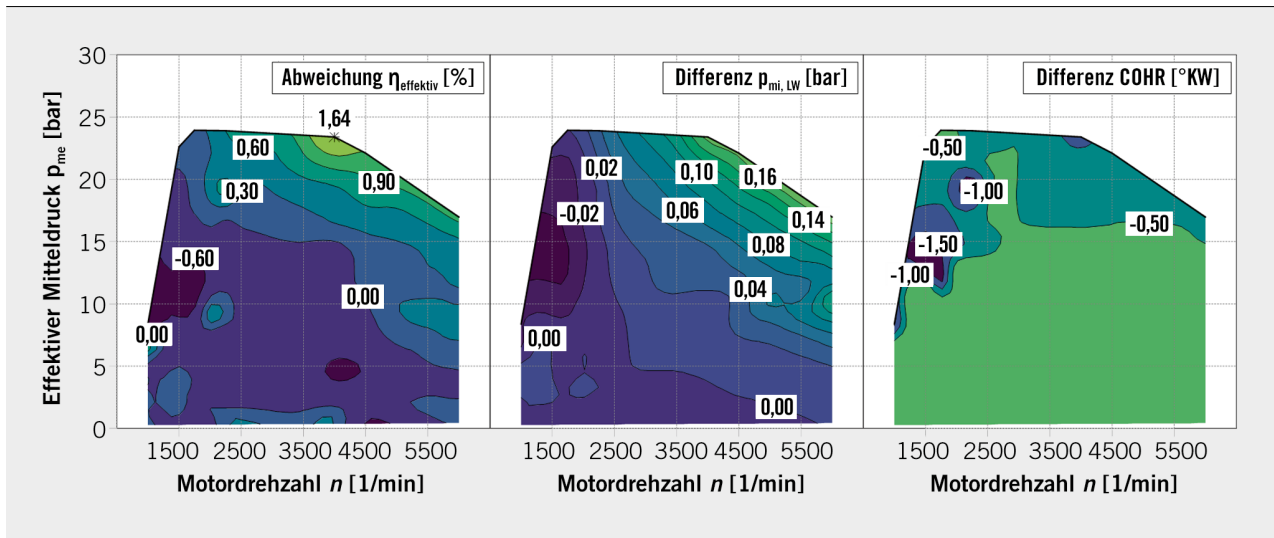


BILD 4 Differenzkennfelder (Ejektordesign – Wastegatedesign) des Pkw-Ottomotors mit Ejektorbypass-ATL (© TME | FZA)

Darstellung des effektiven Wirkungsgrads  $\eta_{\text{effektiv}}$ , BILD 4 (links), verdeutlicht die allgemeine Tendenz des zunehmenden Effizienzvorteils, der mit steigender Leistung (beziehungsweise steigendem Abgasmassenstrom) durch den Ejektoreffekt verursacht wird. Das kennfeldweite Maximum liegt bei 1,64 %. Dieser ist primär auf die sinkende Ladungswechselerarbeit  $p_{\text{mi, LW}}$ , BILD 4 (Mitte), infolge der sich bis vor das Turbinenrad fortpflanzenden Druckabsenkung zurückzuführen. Unterhalb der Saugvollast und im Bereich des Eckdrehmoments zeigen sich erwartungsgemäß keine nennenswerten Wirkungsgradvorteile (kein Ladedruckbedarf und geringe Bypassrate). Der sinkende Abgasgegendruck hat einen abnehmenden Restgasgehalt und damit einhergehend einen geringeren Ladedruckbedarf zur Folge. Die Verbrennung kann daher ohne irreguläre Verbrennungsphänomene bei einer früheren Schwer-

punktlage (Center Of Heat Release, COHR) erfolgen, BILD 4 (rechts) – circa 1 °KW früher im Bereich der Nennleistung.

Durch die beschriebenen Effekte eignet sich die Ejektor-technologie prinzipiell dazu, mit einer kleineren Turbine kombiniert zu werden, um das transiente Ansprechverhalten zu verbessern. Die Nachteile, die sich dadurch hinsichtlich des Abgasgegendrucks ergeben, können in Teilen durch den Ejektoreffekt kompensiert werden. Um diesen Effekt nachzuweisen, wurde der Eintrittsdurchmesser der Turbine im Modell um 1 mm verkleinert. Die Verringerung des Massenträgheitsmoments der Laufgruppe wurde durch ein simplifiziertes CAD-Modell abgeschätzt. BILD 5 zeigt Ergebnisse dieser Konfiguration im Vergleich zum Wastegate-ATL. Der maximale Wirkungsgradvorteil des Ejektordesigns nach Skalierung der Turbine liegt bei 0,8 %, BILD 5 (links). Im restlichen Kennfeld

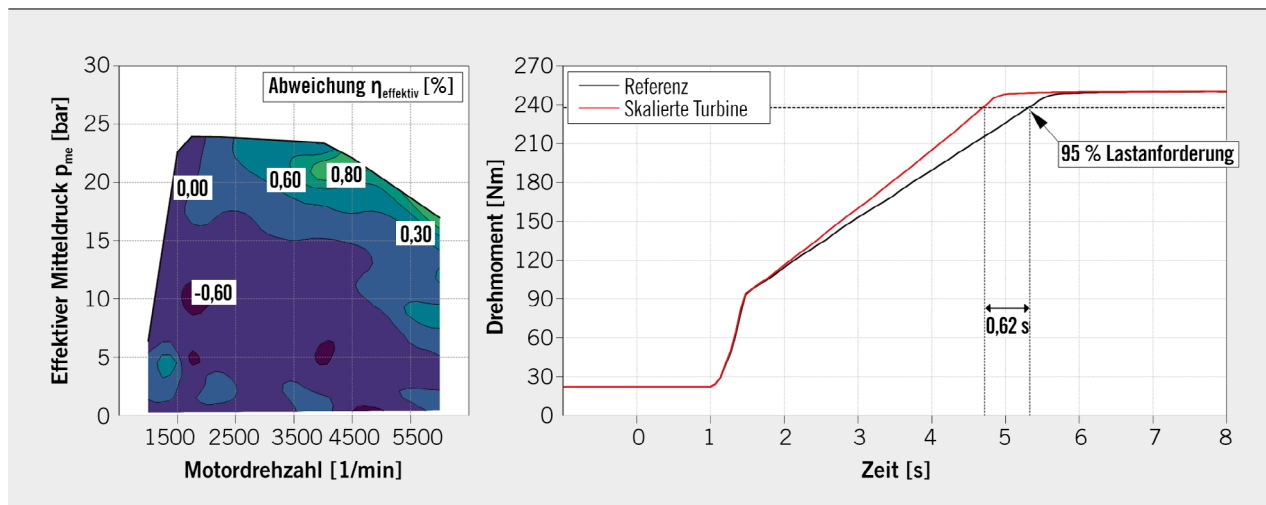
# VISIONEN. ENTWICKLUNG. MOBILITÄT.

Die Welt der Mobilität verändert sich – die Herausforderung der Automobilentwicklung ist das Wissen von morgen mit Blick auf Technologien von übermorgen. Die Komplexität des Mobilitätswandels erfordert wegweisende Lösungen für den Transformationsprozess. ATZelektronik bietet hochaktuelle Informationen aus dem gesamten Spektrum der Automobilelektronik. Nutzen Sie zusätzlich zu den Printausgaben das **interaktive E-Magazin** und profitieren Sie von der einzigartigen **Wissensdatenbank des Onlinearchivs mit pdf-Download**.

**60 TAGE KOSTENLOS!**

# ATZ elektronik

[www.mein-fachwissen.de/ATZelektronik](http://www.mein-fachwissen.de/ATZelektronik)



**BILD 5** Differenzkennfeld (Ejektordesign – Wastegatedesign) des Pkw-Ottomotors mit Ejektorbypass-ATL und skaliertes Turbine (links); Ansprechverhalten des Motors bei einem Lastsprung von  $p_{me} = 2$  bar auf 22,5 bar bei  $n = 1750/\text{min}$  (rechts) © TME | FZA

führt die Maßnahme zu keiner nennenswerten Wirkungsgradverschlechterung. Gleichzeitig zeigt sich bei dem in **BILD 5** (rechts) dargestellten Lastsprung eine deutliche Verbesserung des Ansprechverhaltens: Der Zeitpunkt bis zum Erreichen von 95 % des Zieldrehmoments wird 0,62 s früher erreicht.

Weiterführende Untersuchungen zeigten, dass sich durch die Anwendung eines Ejektorbypass-ATLs ohne kompensierende Maßnahmen (Isolierung der Abgasstrecke, Anpassung der Motorapplikation) deutliche Nachteile in Bezug auf die thermischen Randbedingungen für die Abgasnachbehandlungen ergeben. Durch die zusätzlichen Abgaskomponenten erhöhen sich die Wärmeströme an die Umgebung und die thermische Trägheit des Systems.

Neben der ottomotorischen Anwendung wurde ein Nfz-Dieselmotor (12 l, 400 kW) in die Analyse einbezogen. Die erzielbaren Wirkungsgradvorteile beschränken sich hier brennverfahrensbedingt im Wesentlichen auf die Verbesserung der Ladungswechselarbeit. Durch die geringen Bypassraten über einen breiten Bereich des Motorkennfelds, die sich durch den Betrieb bei Luftüberschuss ergeben, konnten Wirkungsgradvorteile lediglich in einem vergleichsweise engen Kennfeldbereich nahe der Nennleistung erzielt werden. Das Maximum lag bei dem betrachteten Anwendungsfall bei 0,6 %.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen der Grundlagenuntersuchungen konnte gezeigt werden, dass der Düsenquerschnitt und die Bypassrate den größten Einfluss auf die Druckabsenkung hinter der Turbine ausüben. Die Methode zur Designoptimierung eines Ejektorsystems beruhte auf einer neu definierten Ejektoreffizienz als Zielgröße. Mittels eines validierten CFD-Modells konnten der Einfluss des Turboladers auf das Strömungsfeld und der Einfluss des Strömungsfelds auf den Ejektoreffekt analysiert werden. Der Drall bewirkt eine signifikante Verbesserung des Impulsaustauschs zwischen Turbinen- und Düsenstrom, wodurch der Ejektoreffekt gesteigert werden kann.

Für die Potenzialanalyse der Ejektortechnologie konnte ein prädiktives Modell entwickelt werden, das die geometrische Optimierung und die Übertragung auf verschiedene Fahrzeuganwendungen

ermöglicht. Die simulativen Untersuchungen haben gezeigt, dass bei geeigneter Anwendung eines Ejektorbypass-ATLs die Ladungswechselarbeit und der Restgasanteil im Bereich der Nennleistung verringert und damit der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors erhöht werden kann.

Das Optimierungspotenzial für den untersuchten Pkw-Ottomotor lag brennverfahrensbedingt über dem des Nfz-Dieselmotors. Bei Anwendung des Ejektorbypass-ATLs ist mit einem deutlich höheren Bauraumbedarf und einer verringerten Abgasenergie vor Eintritt in die Abgasnachbehandlung zu rechnen. Als Schwerpunkt eines Folgevorhabens bietet sich die Konzeptionierung des Stellorgans an, das zur Realisierung der variablen Primärdüse erforderlich ist. Von zentraler Bedeutung sind hier die Anforderungen an die Robustheit und Dichtigkeit. Darauf aufbauend könnte sowohl ein abschließender funktionaler als auch ökonomischer Vergleich gegenüber der Aufladung mit variabler Turbinengeometrie erfolgen.

## DANKE

Das Forschungsvorhaben „Potentialanalyse von ATL mit Ejektorbypass für unterschiedliche Mobilitätsanwendungen“ (FVV-Nr. 1450) wurde am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) der RWTH Aachen University unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. (USA) Stefan Pischinger und am Fachgebiet Fahrzeugantriebe (FZA) der Technischen Universität Berlin unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Maximilian Brauer durchgeführt. Es wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Förderprogramm 22050 N) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags finanziell gefördert und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dr. Tom Steglich (IAV GmbH) begleitet. Die Autoren bedanken sich bei den Fördergebern, der FVV e. V. und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: [www.mtz-worldwide.com](http://www.mtz-worldwide.com)

# ATZ

seit  
1898

» Wir stehen mit Digitalisierung, CO<sub>2</sub>-freien Antrieben sowie Automatisierung inmitten der größten Transformation der Nutzfahrzeugindustrie. Die ATZ ist in diesen Themen ein wichtiger Impulsgeber und damit Treiber des Wandels. «

**FREDERIK ZOHM**  
MAN Truck & Bus SE

Jetzt  
kostenlos  
testen



[www.meinfachwissen.de/ATZ](http://www.meinfachwissen.de/ATZ)

