

Über 40

Lässt sich der Kraftstoffverbrauch von Ottomotoren noch deutlich verbessern? Und welche Technologien müssen dafür zusammenspielen? Im Auftrag der FVV forschten vier Universitäten gemeinsam am Benziner der Zukunft.

»Unser Ziel bestand darin, dass wir in einem realitätsnahen Fahrzyklus wie dem WLTC durchschnittlich mehr als 40 Prozent Wirkungsgrad erreichen.«



**PROF. DR.-ING.
PETER EILTS**
Institut für Verbrennungskraftmaschinen (ivb),
Technische Universität
Braunschweig



**PROF. DR. TECHN.
CHRISTIAN BEIDL**
Institut für Verbrennungskraftmaschinen (vkm),
Technische Universität
Darmstadt



**PROF. DR.-ING.
STEFAN PISCHINGER**
Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (vka),
RWTH Aachen



**PROF. DR.-ING.
MICHAEL BARGENDE**
Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS),
Universität Stuttgart

ICE 2025+: Ultimate Systemeffizienz // Theorie ist das eine, Praxis das andere. Wie nahe man im realen Fahrbetrieb dem thermodynamischen Optimum kommen kann und was daraus für den Wirkungsgrad eines Fahrzeugs resultiert, untersuchten vier Forschungsinstitute in den letzten zwei Jahren im Auftrag der FVV. Entscheidende Vorgabe dabei: Es sollten nur Technologien zum Einsatz kommen, die in den kommenden Jahren für eine Serieneinführung bereitstünden und so dazu beitragen könnten, die ab 2030 geltenden CO₂-Grenzwerte einzuhalten. Zudem ging es den Forschern nicht darum, einen einzelnen Spitzenwert in einem bestimmten Kennfeldpunkt zu erreichen. »Unser Ziel bestand darin, dass wir in einem realitätsnahen Fahrzyklus wie dem WLTC (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle) durchschnittlich mehr als 40 Prozent Wirkungsgrad erreichen«, erläutert Christian Beidl. Der Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen (vkm) an der Technischen Universität Darmstadt hat im Projekt »ICE 2025+« mit seinen Kollegen Stefan Pischinger aus Aachen, Peter Eilts aus Braunschweig und Michael Bargende aus Stuttgart die Grenzen der ottomotorischen Wirkungsgradsteigerung in hybridisierten Antriebssträngen untersucht.



Foto: Sergii Chernov, Fotolia

Projektdaten

→ »ICE 2025+ Ultimate System Efficiency [1307]:

Grenzen der ottomotorischen Wirkungsgradsteigerung in hybridisierten Antriebssträngen «

→ **PROJEKTFÖRDERUNG**

1,2 Millionen Euro // FVV

→ **PLANUNGSGRUPPE**

PG 2 ›Fremdzündung‹

→ **PROJEKTLEITUNG**

Arndt Döhler, Opel Automobile
Dr. André Casal Kulzer, Porsche

→ **FORSCHUNGSSTELLEN**

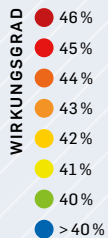
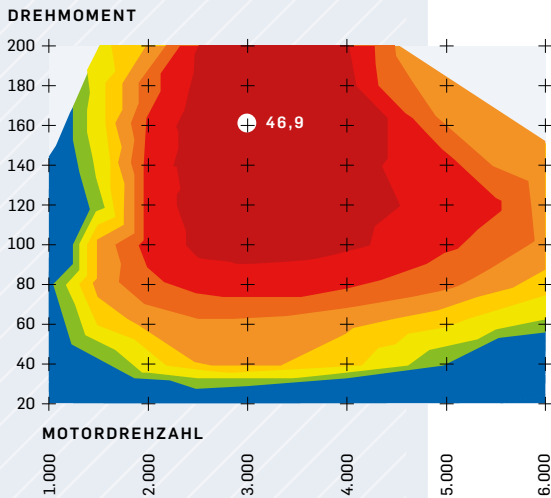
Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS),
Fahrzeugantriebe, Universität Stuttgart
// Institut für Verbrennungskraftmaschinen
(vkm), Technische Universität Darmstadt
// Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen
(vka), RWTH Aachen // Institut für Ver-
brennungskraftmaschinen (ivb), Technische
Universität Braunschweig

Die Technologien, die zur Wirkungsgradsteigerung eines Hubkolbenmotors eingesetzt werden können, sind grundsätzlich bekannt: Variable Verdichtung und flexible Ventilsteuerzeiten, Abgasrückführung, Steuerung der Ladungsbewegung, Vorkammerzündung, Wassereinspritzung oder auch die Auslegung des Motors als Langhuber. Außerdem kann auch eine Hybridisierung zu geringerem Kraftstoffverbrauch beitragen – der Effekt resultiert daraus, dass in sehr niedrigen Lastbereichen, in denen der Ottomotor prinzipbedingt einen schlechten Wirkungsgrad hat, elektrisch gefahren wird. Eingesetzt wird, so die Randbedingungen im Projekt ›ICE 2025+‹, nur elektrische Energie, die an Bord gewonnen wurde.

Ein Problem bleibt allerdings: Nur wenn alle eingesetzten Technologien zusammenspielen, ergibt sich tatsächlich ein Verbrauchsvorteil. Eine reine Addition einzelner Maßnahmen verbietet sich, da sich im Extremfall Technologien auch gegenseitig neutralisieren können, sofern die Betriebsstrategie nicht angepasst wird. »Deswegen haben wir von Anfang an einen systemischen Ansatz verfolgt«, sagt Beidl. Dafür mussten nicht nur die Technologien, sondern auch die Institute zusammenspielen. So wurden für einzelne Technologiepakete zunächst Verbrauchs-

	WIRKUNGSGRAD WLTC	ROUTE A SPORTLICH	ROUTE B SPORTLICH	ROUTE C MODERAT	ROUTE D MODERAT	Ø WIRKUNGSGRAD RDE
Effizienzmotor (ohne AGR)	39,9%	41,7%	41,8%	40,5%	39,7%	40,9%
Effizienzmotor (mit AGR)	40,6%	42,6%	43,2%	41,3%	40,4%	41,9%
Methanolmotor	43,3%	46,0%	45,6%	44,6%	42,5%	44,7%

→ **REAL IST NICHT EGAL:** Die im »ICE 2025+«-Forschungsmotor untersuchten Technologien – so zeigen es die Simulationsergebnisse der TU Darmstadt – fallen im realen Fahrbetrieb sogar besser aus als im Prüfstandszyklus



→ Im **METHANOL-BETRIEB** erreicht der »ICE 2025+«-Motor nahezu im gesamten Kennfeld einen Wirkungsgrad von mindestens 40%.

messungen an einem Einzylinder-Forschungsmotor am Institut für Verbrennungskraftmaschinen (ivb) der TU Braunschweig durchgeführt. Diese wurden am Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) genutzt, um ein Motorsimulationsmodell und daraus ein Kennfeld für einen virtuellen Komplettmotor zu erzeugen. Mit diesem Kennfeld konnten die Forscher in Darmstadt dann komplette Fahrzeuge simulieren und bestimmen, wie viel von der im Kraftstoff gebundenen chemischen Energie auf der Straße ankommt. Dabei betrachteten sie sowohl unterschiedliche Fahrzeugklassen als auch verschiedene Hybridkonfigurationen. In weiteren Versuchen wurde am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA) der RWTH Aachen der normale Ottokraftstoff durch alternative Energieträger ersetzt. »Wir haben uns unter anderem für Methanol entschieden, weil es hervorragende Verbrennungseigenschaften besitzt und einer der regenerativ am effizientesten herzustellenden Flüssigkraftstoffe ist«, sagt Stefan Pischinger, Lehrstuhlinhaber an der RWTH Aachen. Auch die dabei erzeugten Daten wurden an der Universität Stuttgart für die Motorsimulation genutzt, anschließend berechneten die Darmstädter Forscher daraus den Realfahr-Wirkungsgrad.

Zwei Jahre nach dem Startschuss und kurz vor dem Ende der Projektlaufzeit stand bereits fest: Das 40-Prozent-Ziel ist für ein Mittelklassefahrzeug (C-Segment) zu erreichen, wenn es mit normalem

Diese Werte werden nicht nur im Prüfstandszyklus WLTC erreicht, sondern auch in verschiedenen RDE-Zyklen.

Kraftstoff betrieben und mit einem P1- oder einem P2-Hybridantrieb ausgestattet wird. »Diese Werte werden nicht nur im Prüfstandszyklus WLTC erreicht, sondern auch in verschiedenen RDE-Zyklen«, so Beidl. RDE steht für »Real Driving Emissions« und bildet das Fahren im öffentlichen Straßenverkehr nach. Noch besser waren die Ergebnisse, als die Aachener und die Stuttgarter den Normkraftstoff durch Methanol ersetzen: Im Normzyklus erreichte der Antrieb im C-Segment-Fahrzeug mit einem getriebeintegriertem Hybridantrieb einen Wirkungsgrad von 43,4 Prozent, im simulierten Straßenbetrieb durchschnittlich 42,7 Prozent. »Ursache ist vor allem die höhere Brenngeschwindigkeit von Methanol«, so Michael Bargende von der Universität Stuttgart.

Kämen die im Rahmen von »ICE 2025+« erforschten Technologien in Serie, entstünde ein extrem effizienter Benziner. Prinzipbedingt kann er den Wirkungsgrad eines Dieselmotors jedoch nicht ganz erreichen, so lange er mit einem stöchiometrischen Luft-Kraftstoffverhältnis ($\lambda = 1$) betrieben wird. Allerdings funktioniert die beim Ottomotor erprobte Abgasreinigung per Drei-Wege-Kat weiterhin, auf die vom Diesel bekannte, deutlich aufwändigere SCR-Technik kann verzichtet werden. Darüber hinaus wurden die zusätzlichen Potenziale eines Magerbetriebs untersucht, allerdings immer noch mit Technologiebausteinen, die sich an den Randbedingungen einer

Serieneinführung orientieren. »Wenn der Methanolmotor mit Luftüberschuss betrieben wird, ist das Verbrauchsniveau sogar besser als bei einem Diesel-Pkw«, so Bargende. »In einem großen Teil des Motorkennfeldes werden mehr als 40 Prozent Wirkungsgrad erreicht, in der Spitze sogar 46,9 Prozent.« Das entspricht im Vergleich mit einem aktuellen Ottomotor, der in jeder Hinsicht dem Stand der Technik entspricht, einer CO₂-Reduzierung um bis zu 25 Prozent.

»Genau das war unser Ziel«, bekräftigt Beidl: »Den Verbrauch im gesamten Kennfeld deutlich zu verringern und nicht nur einen einzelnen Spitzenwert in einem bestimmten Betriebspunkt zu erreichen.« Der Fachmann zeigt sich überzeugt: »Auch wenn man bei einer Serienumsetzung auf einzelne Technologiebausteine wie die variable Verdichtung verzichtet, lässt sich die Effizienz des Ottomotors noch sehr deutlich verbessern.« //