

AUTOREN



**PROF. DR. LINO GUZZELLA**  
ist Leiter des Lehrstuhls für Thermotronik am Institut für dynamische Systeme und Regelungstechnik (IDSC) der ETH Zürich (Schweiz).



**DR. CHRISTOPHER ONDER**  
ist Oberassistent am Institut für dynamische Systeme und Regelungstechnik (IDSC) der ETH Zürich (Schweiz).



**DIPL.-ING. CHRISTIAN DÖNITZ**  
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für dynamische Systeme und Regelungstechnik (IDSC) der ETH Zürich (Schweiz).



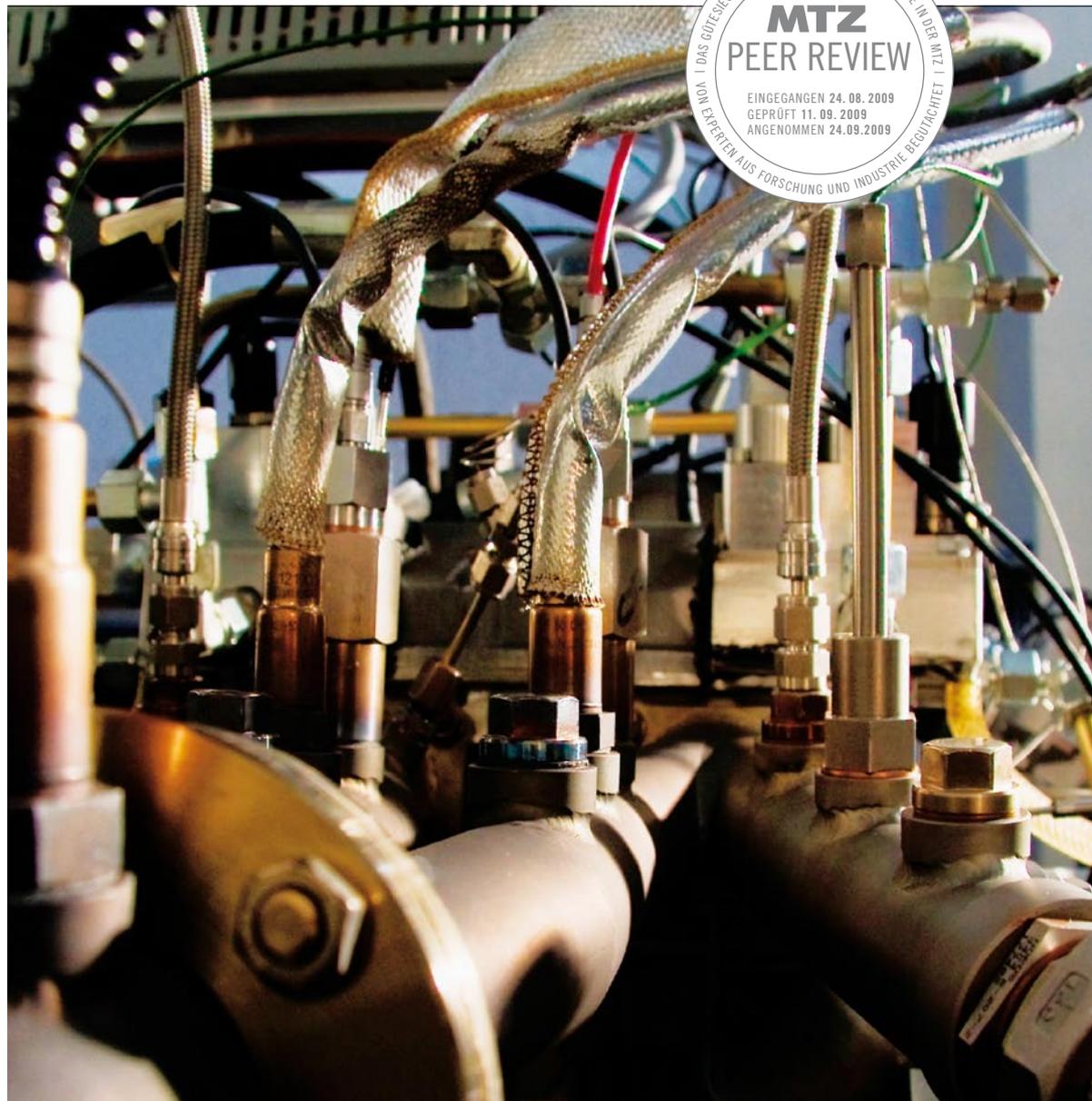
**MSC ETH ME CHRISTOPH VOSER**  
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für dynamische Systeme und Regelungstechnik (IDSC) der ETH Zürich (Schweiz).



**DR. IULIAN VASILE**  
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für dynamische Systeme und Regelungstechnik (IDSC) der ETH Zürich (Schweiz).

# DAS DOWNSIZING-BOOST-KONZEPT AUF BASIS DER PNEUMATISCHEN HYBRIDISIERUNG VON OTTOMOTOREN

Nach erfolgreich abgeschlossenen Grundlagenuntersuchungen stellt die ETH Zürich den weltweit ersten vollfunktionalen pneumatischen Hybridmotor vor. Die pneumatische Hybridisierung von Ottomotoren dient in erster Linie dazu, mit minimalen Zusatzkosten ein maximales Downsizing zu ermöglichen. Dies erfolgt bei gleichzeitiger Verbesserung des Ansprechverhaltens. Für dieses Motorkonzept konnte, bei gleicher Nennleistung, ein Verbrauchsvorteil von bis zu 35 % im NEFZ nachgewiesen werden.



- 1 Einleitung
- 2 Downsizing
- 3 Pneumatische Hybridisierung
- 4 Das Konzept der ETH Zürich
- 5 Hardware und Prüfstand
- 6 Messergebnisse
- 7 Ergebnisse der Fahrzyklen
- 8 Zusammenfassung

## 1 EINLEITUNG

Eine berechtigte Skepsis ist stets angebracht, wenn es um Antriebe geht, die auf exotischen Energieträgern basieren. Komprimierte Luft weist im Vergleich mit konventionellen Kraftstoffen eine sehr niedrige Energiedichte auf. Somit würden für primär auf Druckluft basierende Antriebssysteme inakzeptabel niedrige Reichweiten resultieren. Es muss daher betont werden, dass das vorliegende Konzept nicht auf Druckluft als primärem Energieträger basiert, sondern auf konventionellem Kraftstoff.

## 2 DOWNSIZING

Große Saug-Ottomotoren erfreuen sich nach wie vor hoher Beliebtheit bei leistungsbewussten Automobilisten. Durch die allgegenwärtige Kraftstoffverbrauchs- und CO<sub>2</sub>-Problematik müssen jedoch sparsamere Antriebskonzepte in den Vordergrund rücken, die aber nach wie vor die Kundenwünsche berücksichtigen. Die elektrische Hybridisierung kann diese Anforderungen erfüllen, jedoch sind die damit verbundenen Zusatzkosten sehr hoch.

Das Downsizing von Verbrennungsmotoren – ohne eine ergänzende elektrische Hybridisierung – birgt ebenso das Potenzial, den Verbrauch signifikant zu senken. Dabei wird die ursprüngliche Leistung des Saugmotors durch den Einsatz eines Turboladers erreicht. Die Verbrauchsvorteile resultieren aus geringerer Reibung, und noch wichtiger: Der Motor wird häufiger in Bereichen mit höherem Wirkungsgrad betrieben [1, 2]. Die Anfänge des Downsizings zur Verbrauchsreduktion liegen nun weit mehr als zehn Jahre zurück [3]; mittlerweile ist das Downsizing eine häufig eingesetzte Maßnahme.

Sie beschränkt sich in der Praxis jedoch meist auf moderate Aufladungen (relativ zur maximal möglichen Aufladung), weil nach wie vor ein gutes Ansprechverhalten gewährleistet sein muss. Zudem wird versucht, das „Turboloch“ durch kleine, dynamikoptimierte Turbinen oder teure variable Turbinengeometrie zu bekämpfen.

Um das volle Potenzial des Downsizings ausnützen zu können, ist aber ein Konzept gefragt, welches ein optimales Ansprechverhalten auch bei niedrigen Motordrehzahlen garantiert. Als Lösungsansätze wurden bereits Konzepte mit Druckwellenlader [4] oder mit zweistufiger Aufladung [5] präsentiert, hier soll eine weitere Alternative aufgezeigt werden.

## 3 PNEUMATISCHE HYBRIDISIERUNG

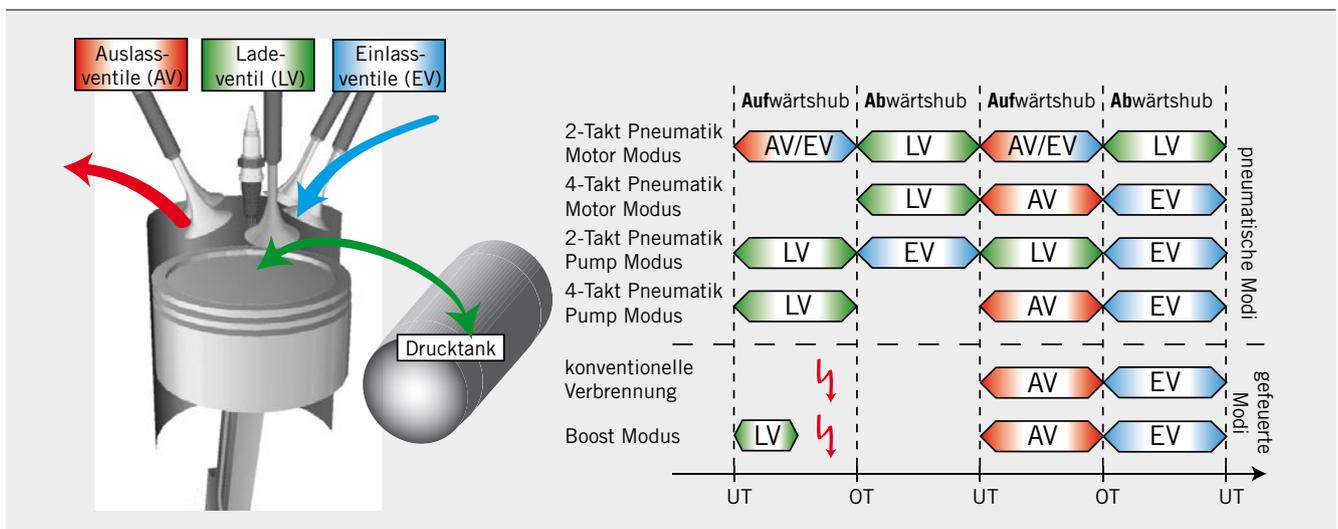
Seit dem Ende der 1990er-Jahre wurde in der Wissenschaft die Möglichkeit der pneumatischen Hybridisierung von Verbrennungsmotoren untersucht [6, 7]. Die Grundidee besteht darin, den Verbrennungsmotor zusätzlich als bremsenergienutzende Pumpe sowie als Druckluft-Expansionsmotor zu nutzen. Dies kann durch das Anschließen eines Drucktanks mittels elektronisch ansteuerbarer Laedventile, ❶, links, realisiert werden.

Neben der Rekuperation offeriert die Idee einerseits die Möglichkeit einer Start-Stopp-Funktion mit einem sehr schnellen pneumatischen Start und andererseits eine Betriebspunktverschiebung, bei der man die Hälfte der Zylinder verbrennen lässt, während die andere Hälfte der Zylinder pumpt („Recharge“-Modus).

In bisherigen Konzepten wurde angenommen, dass diese Funktionen nur dann realisiert werden können, wenn alle Ventile des Zylinders variabel angesteuert werden, um den Verbrennungsmotor zusätzlich als Zweitakt-Pumpe beziehungsweise als Zweitakt-Expansionsmaschine verwenden zu können.

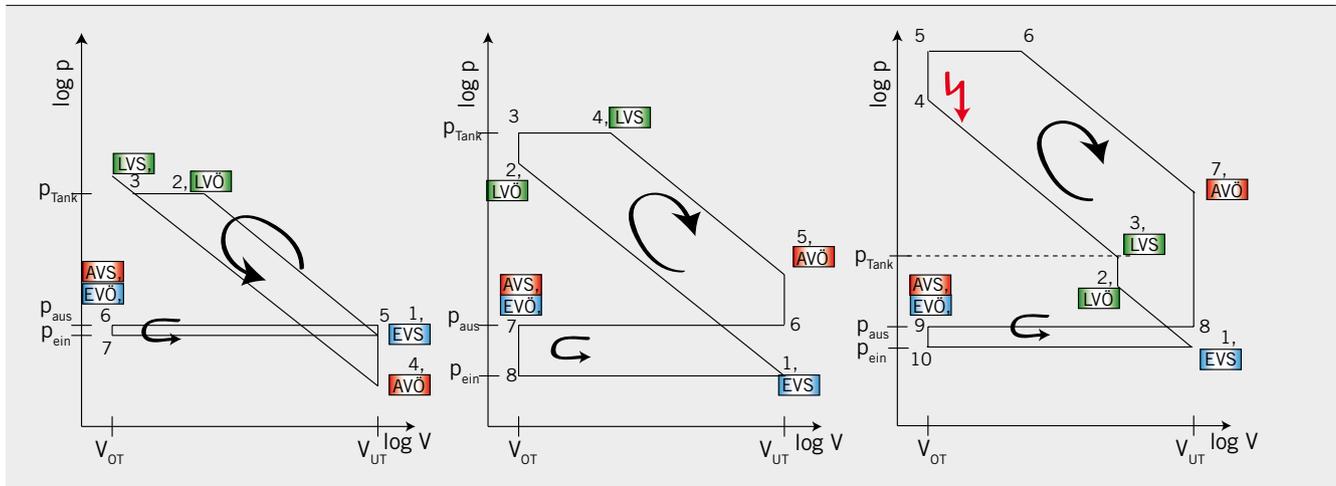
## 4 DAS KONZEPT DER ETH ZÜRICH

Für das an der ETH Zürich entwickelte Konzept wurde zunächst untersucht, ob nicht auch eine deutlich weniger aufwändige Ausführung der pneumatischen Hybridisierung zielführend bezüglich Funktionalität und Verbrauchsvorteil sein kann. In [8] wurde gezeigt, dass



❶ Prinzip der pneumatischen Hybridisierung und Ventilanforderungen, AV = Auslassventile, LV = Ladeventil, EV = Einlassventile

2 Zusätzliche Motormodi – Pump-Modus (links), Pneumatikmotor-Modus (Mitte), Boost-Modus (rechts)



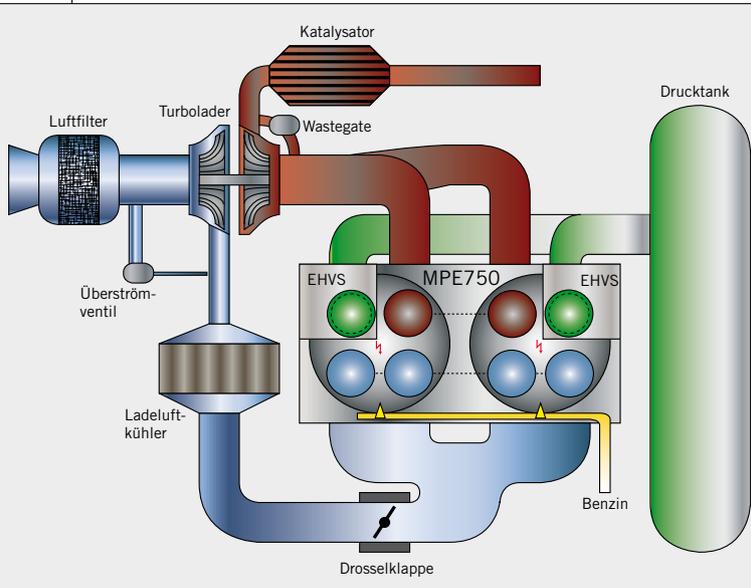
es ausreichend ist, wenn die Ein- und Auslassventile weiterhin nockenwellengesteuert bleiben, während lediglich das Ladeventil vollvariabel angesteuert wird. Somit resultieren ein Viertaktbetrieb für alle Betriebsmodi, ①, rechts, und daher ein System mit stark reduzierter Komplexität und minimalen Zusatzkosten.

In ② sind die zusätzlichen Motormodi in doppeltlogarithmischen p-V-Diagrammen vereinfacht dargestellt. Der Pneumatik-Motor-Modus auf Viertaktbasis weist dabei eine Besonderheit auf: Hier kann mehr Drehmoment durch das Schließen der Drosselklappe erzeugt werden. Durch den niedrigeren Einlassdruck wird die im Kompressionstakt zu leistende Arbeit reduziert und gleichzeitig wird ermöglicht, dass bei gegebenem Tankdruck mehr Druckluft in den Zylinder strömen kann.

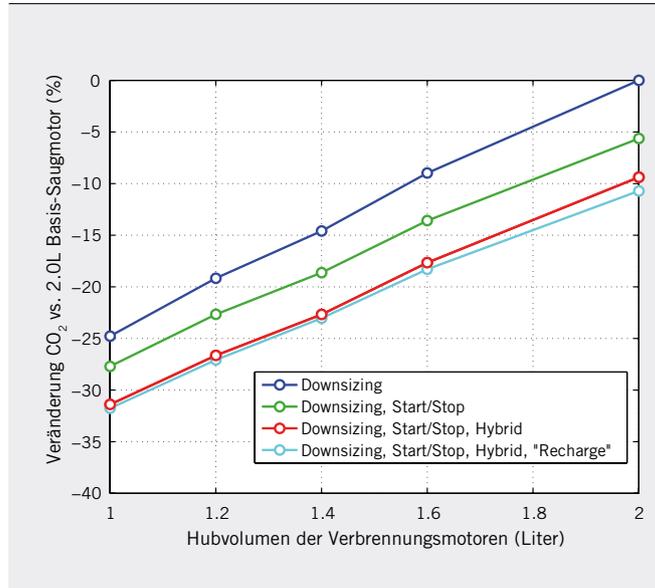
Der Kern des neuen Konzepts jedoch ist der Boost-Modus, der eine Abwandlung des konventionellen Verbrennungszyklus darstellt, ②, rechts. Dabei wird Druckluft während des Kompressionsvorgangs in

den Zylinder eingeblasen. Die zusätzliche Luft ermöglicht es, mehr Kraftstoff einzuspritzen. Es wird stets ein stöchiometrisches Verbrennungsgemisch angestrebt. Dies ist ein weiterer Eckpunkt des Konzepts, das mit Hilfe der bewährten und kostengünstigen Drei-Wege-Katalysatortechnik auf niedrigste Emissionen abzielt.

Der Boost-Modus ermöglicht den schnellstmöglichen Drehmomentsprung. Der große Vorteil dabei liegt in der Verwendung des „Boost“ für ein Downsizing-Motorkonzept mit Turboaufladung. Dort kann die bei Transienten fehlende Luft im System nun zu jedem Zeitpunkt bereitgestellt werden. Aus der hohen Kraftstoffenergie resultiert eine hohe Abgasenthalpie, die den Turbolader beschleunigt und somit die Zusatzluft nur für wenige Sekunden notwendig macht. Daraus folgt der Kerngedanke des vorgestellten Konzepts: die Umsetzung der Synergieeffekte aus pneumatischer Hybridisierung und Downsizing mit Turboaufladung. Ein Schema des untersuchten Gesamtkonzepts ist in ③ dargestellt.

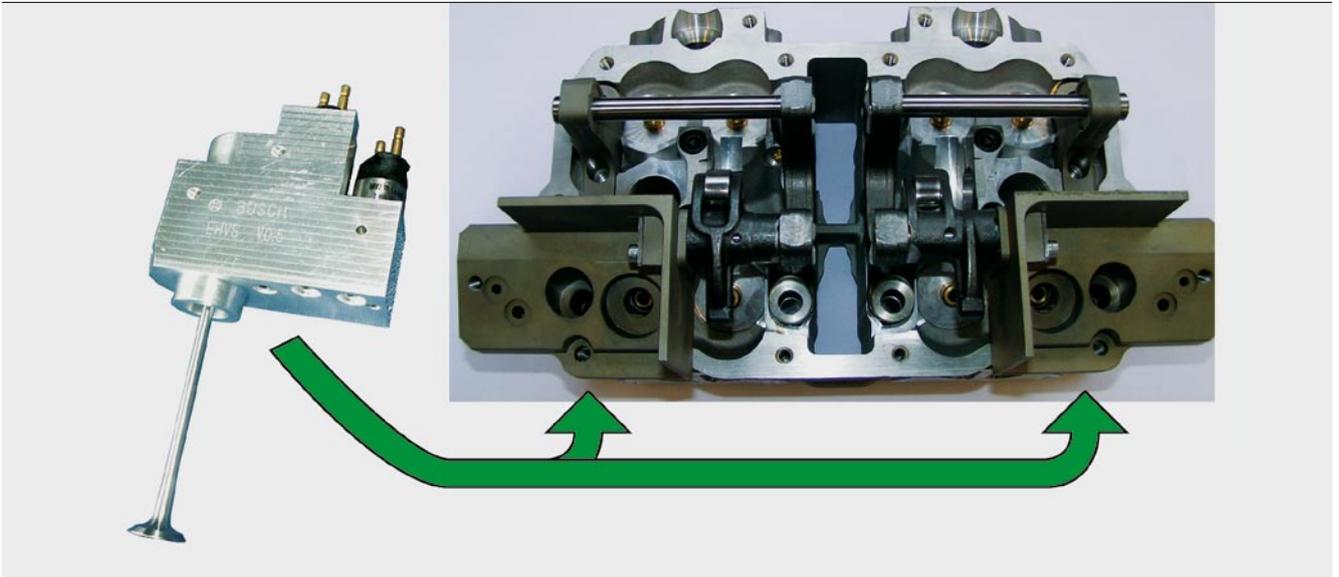


3 Schema des Downsizing-Boost-Konzepts



4 Studie zum Kraftstoffeinsparpotenzial (NEFZ)

5 Modifizierter Ottomotor MPE750 mit elektrohydraulischem Ventilsystem



Eine weitere Konsequenz des beschriebenen Synergieeffekts ist das Wegfallen der Notwendigkeit, den Turbolader auf gutes Ansprechverhalten auslegen zu müssen. Stattdessen ist es nun möglich, das System maximal aufzuladen und den Turbolader auf höchste Effizienz auszuladen. So werden höhere Mitteldrücke und damit ein maximales Downsizing ermöglicht.

Das Hauptaugenmerk des vorgestellten Konzepts liegt auf dem erzielbaren Verbrauchsvorteil. In [9] wurde mit Hilfe quasistatischer Simulation untersucht, welche Verbrauchsvorteile sich aufgrund der genannten Konzeptbausteine ergeben. Die Ergebnisse sind in 4 zusammengefasst. Der Basismotor ist ein Saug-Ottomotor mit einem Hubvolumen von 2,0 l und 100 kW Nennleistung; bei den Downsizing-Motoren wird diese Nennleistung über Turboaufladung erreicht. Der wichtigste Beitrag des Einsparpotenzials resultiert aus dem konsequenten Downsizing, während die Start-Stopp-Funktion, die Rekuperation und der optionale „Recharge“-Modus lediglich untergeordnete Rollen spielen.

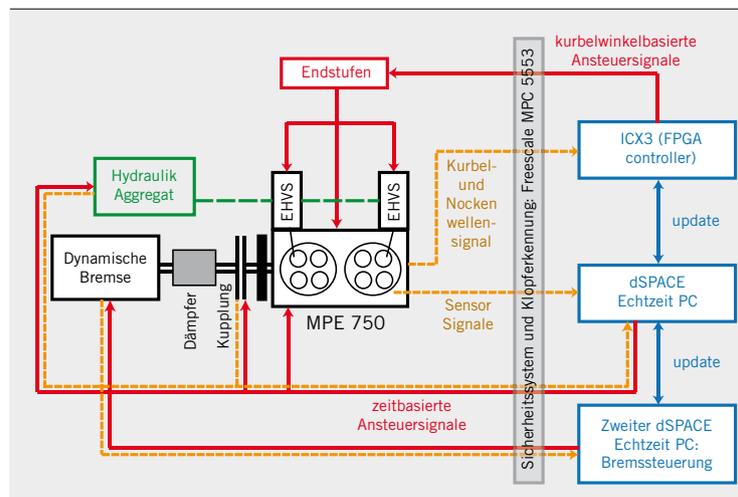
5 HARDWARE UND PRÜFSTAND

Für die Untersuchung des Konzepts wurde ein konventioneller Ottomotor (MPE750 von der Firma Weber Automotive) modifiziert. Es handelt sich um einen aufgeladenen Zweizylindermotor mit 0,75 l Hubraum (Verdichtungsverhältnis 9,0), Benzinsaugrohreinjection und einer Nennleistung von 61 kW. Für die pneumatische Hybridisierung wurde je ein Auslassventil pro Zylinder durch ein Ladeventil ersetzt. Für eine Serienanwendung des Konzepts wäre jedoch eine Neukonstruktion des Zylinderkopfes notwendig, damit ein idealer Kompromiss bezüglich Abgasgedruck bei hohen Drehzahlen, Füllungsgrad und Boost-Kapazität realisiert werden kann. Eine zusätzliche Benzindirekteinspritzung würde die Anforderungen an die Zylinderkopfkonstruktion noch weiter erhöhen.

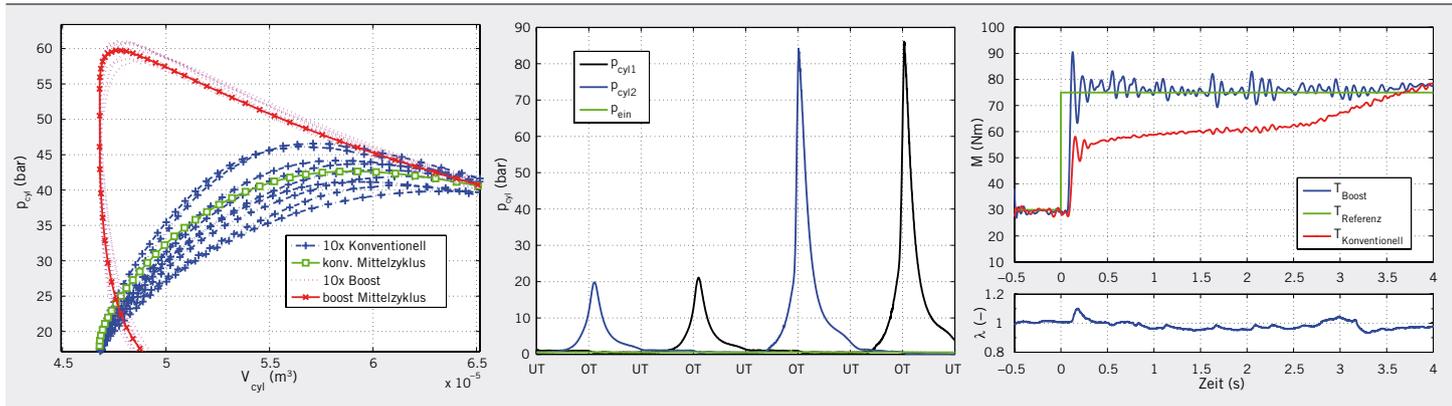
Die Ladeventile werden mit dem elektrohydraulischen Ventilsystem (EHVS), einem Forschungswerkzeug der Firma Robert Bosch GmbH, betätigt, 5. Das EHVS ermöglicht eine nahezu beliebige Variation des Öffnungs- und Schließwinkels sowie der Öffnungsgeschwindigkeit und

des Hubes von einer zur nächsten Umdrehung [10]. Eine mögliche Kollision mit den Kolben wurde durch eine Hubbeschränkung auf 5 mm ausgeschlossen. Durch diese vollvariable Ventilsteuerung ist es möglich, alle in 2 dargestellten zusätzlichen Modi zu realisieren.

Um das Downsizing des Motors voll auszuschöpfen, wurde die Turbine des GT-12-Laders durch die Turbine des GT-14-Laders ersetzt. Als Lufttank wurde für die Testphase ein 30-l-Stahltank gewählt, der hauptsächlich im Bereich von 4 bis 16 bar betrieben wird. In [11] wurde gezeigt, dass das Volumen des Tanks auch in der Größenordnung von etwa 10 bis 15 l gewählt werden kann, ohne dass Einsparpotenzial des Konzepts einzuschränken. Der Tank ist nicht isoliert, damit die Luft auf Umgebungstemperatur gehalten wird. So wird die Klopfneigung beim Einsatz des Boost-Modus stark reduziert. Die Prüfstandsarchitektur, 6, wurde für Sensorik und Aktuatorik im Kurbelwinkel- und Zeitbereich ausgelegt, was den Einsatz eines flexibel programmierbaren Prozessors (FPGA) nahelegt. Da das IDSC mit der sehr leistungs-



6 Prüfstandsarchitektur



7 Boost-Modus-Messungen – Verbrennungseigenschaften (links), Drehmomentsprung (Mitte), Turbolochüberbrückung (rechts)

fähigen Eigenentwicklung ICX-3 über ein geeignetes Werkzeug verfügt [12], konnten die Forschungsarbeiten zügig vorangetrieben werden.

6 MESSEERGEBNISSE

Beim Boost-Modus erweist sich das Einblasen zusätzlicher Druckluft als vorteilhaft für die Verbrennung, 7, links. Durch die erzeugte Turbulenz resultiert eine schnelle und stabile Verbrennung.

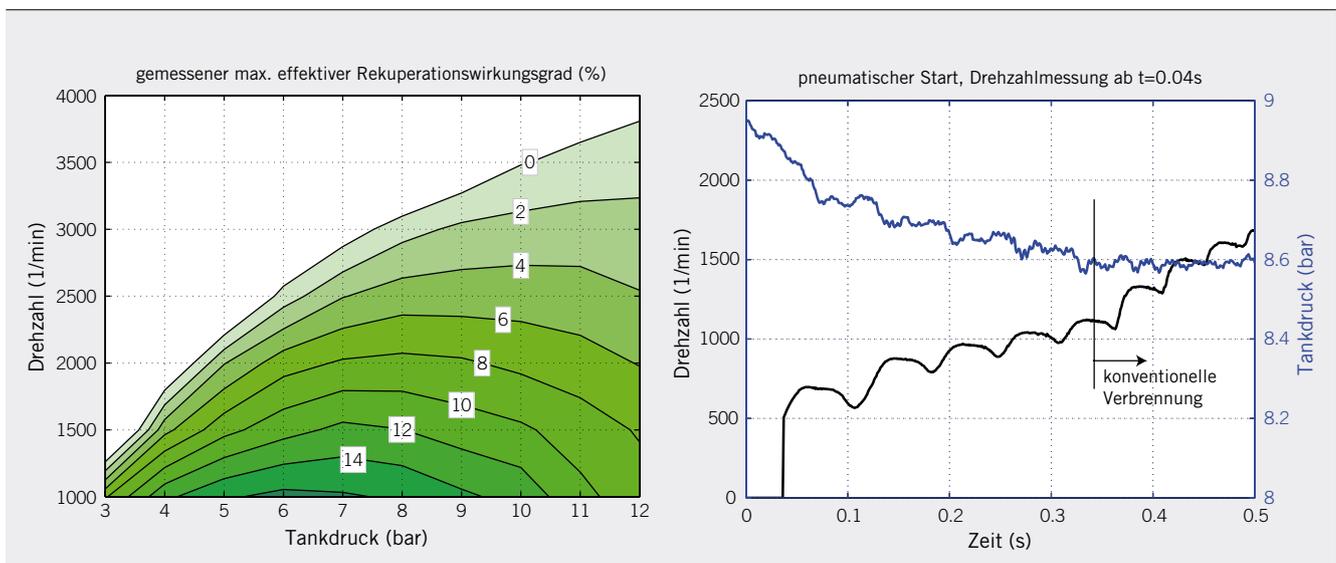
Für das diskutierte Konzept jedoch wird dieser Modus nur kurz eingesetzt, so dass die Hauptfunktion des Boost-Modus, die Turbolochüberbrückung, in den Vordergrund tritt: Im Boost-Modus können instantane Drehmomentsprünge realisiert werden, 7, Mitte. Hier wurde ein Sprung von 10 auf 90 % des maximalen Drehmoments realisiert und mit Hilfe von Zylinderdruckmessungen aufgezeichnet. Mit solchen Drehmomentsprüngen wird das Turboloch eliminiert, 7, rechts. Die rote Kurve zeigt die Dynamik des Systems ohne Boost-Modus. Durch den Vergleich wird klar, dass die pneumatische Hybridisierung ein starkes Downsizing erst ermöglicht.

Die Umsetzung dieses Drehmomentsprungs stellt hohe Anforderungen an viele der Steueralgorithmen und deren zugrundeliegender

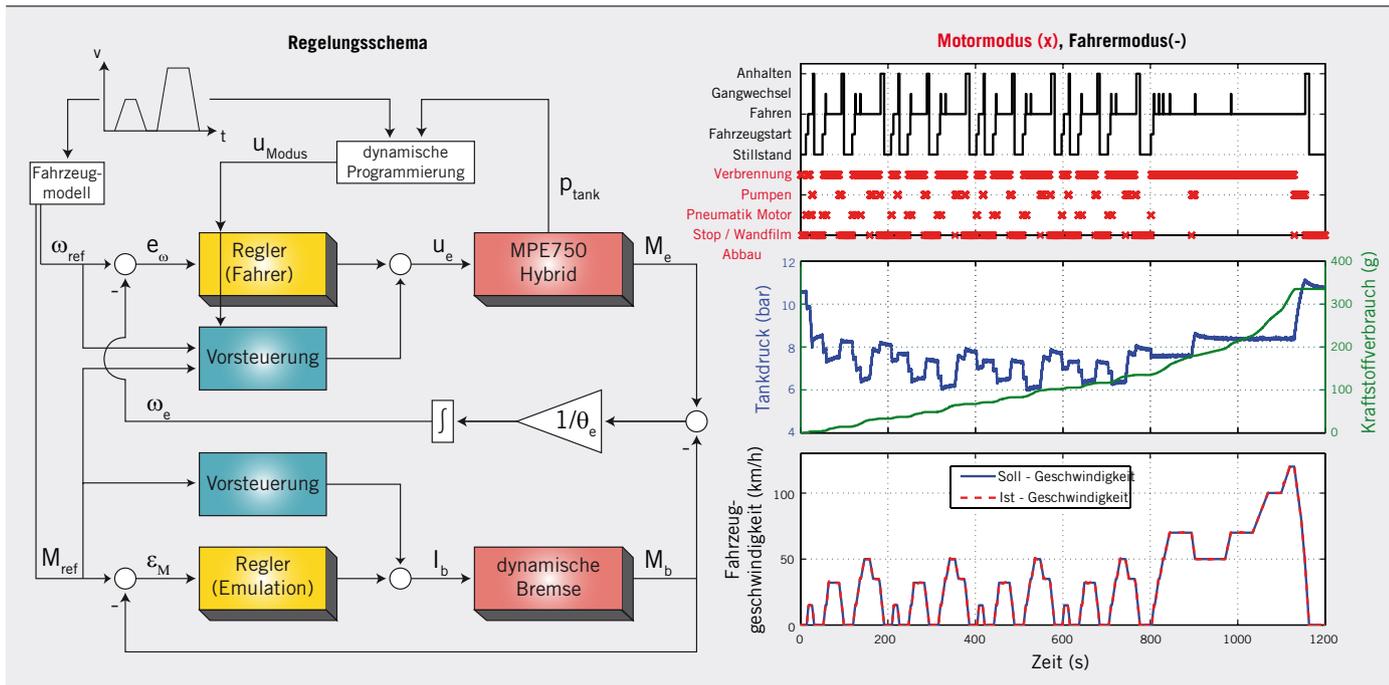
Modelle. Es muss hinreichend genau abgeschätzt werden können, wie hoch die durch die Einlassventile angesaugte Luftmasse sowie die tatsächlich in den Brennraum gelangende Kraftstoffmenge sind.

Vor der Lufteinblasung werden in Transienten Luftverhältnisse von bis zu  $\lambda = 0,4$  angestrebt; daher muss eine präzise modellbasierte Vorsteuerung des EHVS sicherstellen, dass genau die für  $\lambda = 1$  fehlende Luftmasse eingeblasen wird, um Fehlzündungen zu vermeiden. Zudem muss durch Überwachungsalgorithmen sichergestellt werden, dass das Ladeventil geschlossen ist, wenn der Zylinderdruck den Tankdruck überschreitet.

Bei den reinen Pneumatik-Motor-Modi konnten Pump-Modus und Motor-Modus für große Kennfeldbereiche realisiert werden. Die Nutzung der rekuperierten Energie zum pneumatischen Fahren trägt jedoch wie erwartet nicht viel zum Verbrauchsvorteil bei, wie aus den niedrigen gemessenen effektiven Rekuperationswirkungsgraden in 8, links, geschlossen werden kann. Der pneumatische Start kann ebenfalls dargestellt werden, 8, rechts. Dabei sinkt der Druck um etwa 300 mbar pro Start ab (bei einem Tankvolumen von 30 l). Der pneumatische Start ist mehr als doppelt so schnell wie ein herkömmlicher Motorstart und rechtfertigt somit den Start-Stopp-Betrieb.



8 Pneumatik-Modus-Messungen – gemessene effektive regenerative Wirkungsgrade (links), Messung eines pneumatischen Motorstarts (rechts)



9 Reglerstruktur für die Fahrzeugemulation (links), Verbrauchs- und Tankdruckmessung sowie Darstellung der Motor- und Fahrermodi bei der Emulation des VW Polo mit modifiziertem MPE750 (rechts)

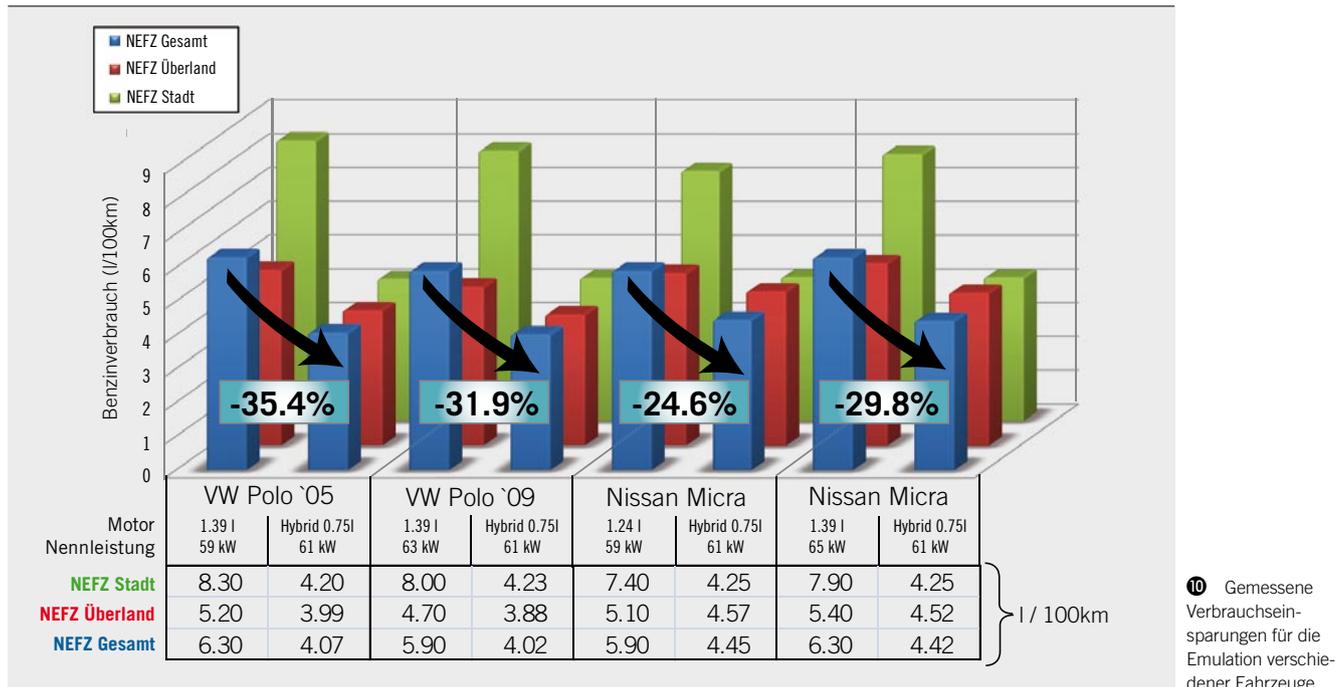
## 7 ERGEBNISSE DER FAHRZYKLEN

Der Nachweis des Verbrauchsvorteils durch das vorgestellte Konzept wurde mit Hilfe einer Fahrzeugemulation am hochdynamischen Prüfstand erbracht. Dabei fungiert die dynamische Bremse als virtuelles Fahrzeug in einem Fahrzyklus. Für die Motor- und Bremssteuerung wurden für sämtliche relevanten Systeme Regelalgorithmen in einer Matlab/Simulink-Umgebung programmiert. Dazu gehören einerseits sämtliche für den konventionellen Betrieb notwendigen Regelungen, die Regelung der pneumatischen Startvorgangs. Andererseits muss ein Fahrerregler programmiert werden, der stets ein geeignetes Drehmoment fordern muss, sowie ein Regler für die Bremse, die das Fahrzeug emuliert analog zur Struktur in 9, links.

Da der Pump-Modus auf einem Viertaktzyklus basiert, ist in diesem Modus das rekuperierbare Drehmoment limitiert, so dass im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) mit einem VW Polo zirka 500 kJ nicht durch Pumpen rekuperiert werden können. Dies eröffnet jedoch die Option, mittels eines Generators die Differenz elektrisch zu rekuperieren und für elektrische Komponenten verfügbar zu machen.

In 9, rechts, kann man das Ergebnis für den modifizierten Motor in einem virtuellen VW Polo sehen. Die Methode der dynamischen Programmierung liefert dabei den optimalen Motormodus zu jedem Zeitpunkt und garantiert zudem die Ladungserhaltung im Drucktank. Der virtuelle Fahrer kann das geforderte Geschwindigkeitsprofil ohne Probleme in den geforderten Grenzen einhalten.

Um einen fairen Vergleich zu ermöglichen, wurden aktuelle Fahrzeuge mit Motoren ähnlicher Spitzenleistung als Vergleichsbasis ge-



wählt. Die gemessenen Kraftstoffverbräuche sind in ⑩ dargestellt. Die Verbrauchsvorteile des vorgestellten Konzepts bewegen sich zwischen 25 und 35 %, je nach betrachtetem Fahrzeug und Motorisierung. Es wurde angenommen, dass kein zusätzliches Drehmoment für das Betreiben von elektrischen Aggregaten notwendig ist, weil eine elektrische Rekuperation für deren Energiebedarf ausreichend ist.

**8 ZUSAMMENFASSUNG**

Das an der ETH Zürich entwickelte Downsizing-Boost-Konzept auf Basis der pneumatischen Hybridisierung von Ottomotoren konnte mit einem modifizierten Zweizylindermotor (0,75 l Hubraum, 61 kW Nennleistung) realisiert werden. Die gemessenen Resultate bestätigen die umfangreichen Voruntersuchungen im Bezug auf Agilität und Verbrauchsvorteil.

Mit diesem Konzept konnte der schnellstmögliche Drehmoment-sprung, der auf dem Luftpfad möglich ist, realisiert werden. Beim Kraftstoffverbrauch ergeben sich Einsparpotenziale von bis zu 35 %. Die genannten Ergebnisse können ebenso mit einer elektrischen Hybridisierung erreicht und übertroffen werden. Jedoch sind die assoziierten Zusatzkosten für eine pneumatische Hybridisierung um ein Vielfaches niedriger als für eine elektrische Hybridisierung.

**DANKE**

Die Forschungsarbeit des IDSC der ETH Zürich wird in dem Projekt zur pneumatischen Hybridisierung unterstützt vom Bundesamt für Energie (BfE) der Schweiz, von der Firma Robert Bosch GmbH und der Firma swissauto Wenko AG. Die Autoren bedanken sich herzlich bei diesen Partnern für ihre Hilfe.

**LITERATURHINWEISE**

[1] Guzzella, L.; Onder, C.: Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems. Berlin: Springer, 2004  
 [2] Guzzella, L.; Sciarretta, A.: Vehicle Propulsion Systems. Berlin: Springer, 2nd Edition, 2007  
 [3] Pfiffner, R.; Weber, F.; Amstutz, A.; Guzzella, L.: Modeling and Model-based Control of Supercharged SI-Engines for Cars with Minimal Fuel Consumption. In: Proceedings 16th American Control Conference (1997), Vol. 1, pp. 304-308  
 [4] Guzzella, L.; Martin, R.: Das Save-Motorkonzept. In: MTZ 59 (1998), Nr. 10, S. 644-650  
 [5] Krebs, R.; Szengel, R.; Middendorf, H.; Fleiß, M.; Laumann, A.; Voeltz, S.: Neuer Ottomotor mit Direkteinspritzung und Doppelaufladung von Volkswagen. Teil 1. In: MTZ 66 (2005), Nr. 11, S. 844-856  
 [6] Schechter, M.: New Cycles for Automobile Engines. SAE Technical Paper 1999-01-0623, USA, 1999  
 [7] Higelin, P.; Charlet, A.; Chamaillard, Y.: Thermodynamic Simulation of a Hybrid Pneumatic Combustion Engine Concept. In: Int. J. of Applied Thermodynamics, Vol. 5 (2002), No. 1, pp 1-11  
 [8] Dönitz, C.; Vasile, I.; Onder, C.; Guzzella, L.: Modelling and Optimizing Two and Four-Stroke Hybrid Pneumatic Engines. In: Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering, Vol. 223 (2009), No. 2, pp 255-280  
 [9] Dönitz, C.; Vasile, I.; Onder, C.; Guzzella, L.: Dynamic Programming for Hybrid Pneumatic Vehicles. In: Proceedings 28th American Control Conference (2009), USA, pp 3956-3963  
 [10] Mischker, K.; Denger, D.: Anforderungen an einen vollvariablen Ventilttrieb und Realisierung durch die elektrohydraulische Ventilsteuerung EHVS. In: 24. Internationales Wiener Motoren-symposium, Österreich, 2003  
 [11] Dönitz, C.; Vasile, I.; Onder, C.; Guzzella, L.: Realizing a Concept for High Efficiency and Excellent Driveability: The Downsized and Supercharged Hybrid Pneumatic Engine. SAE Technical Paper 2009-01-1326, USA, 2009  
 [12] Guzzella, L.; Geering, H. P.; Hirzel, H.: Anwendungsspezifische Chips für die Regelung von Ottomotoren. Technische Rundschau, 1987, Nr. 1/2, S. 46-49

↓ **DOWNLOAD DES BEITRAGS**  
[www.MTZonline.de](http://www.MTZonline.de)

🇬🇧 **READ THE ENGLISH E-MAGAZINE**  
 order your test issue now: [SpringerAutomotive@abo-service.info](mailto:SpringerAutomotive@abo-service.info)