

© IHI Corporation

Elektrifiziertes Aufladesystem für hocheffiziente Verbrennungsmotoren

IHI hat ein elektrifiziertes Aufladesystem entwickelt, mit dem die Potenziale von Ottomotoren mit Miller-Steuerzeiten weiter gesteigert werden können. Die hohe Aufladeeffizienz basiert auf einer Festgeometrieturbine, die ohne zusätzliche Regelungskomponenten auskommt.

HÖHERE ANFORDERUNGEN AN DIE AUFLADUNG

Der Verbrennungsmotor (VM) wird auch im Antriebsmix der Zukunft eine zentrale Rolle einnehmen. Zukünftige CO₂-Ziele erfordern dabei den Einsatz neuer fortschrittlicher Technologien. Die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen bei gleichzeitiger Steigerung der Antriebsdynamik bleibt in diesem Zusammenhang der treibende Zielkonflikt. Als effektiver, zugleich vergleichsweise einfacher und kosteneffizienter Ansatz bei Ottomotoren hat sich der Miller-Zyklus erwiesen – hier als Begriff gleichermaßen für das

AUTOREN



Martin Rode, M. Sc.
ist Senior-Entwicklungsingenieur
Turbolader-Definition bei der
IHI Charging Systems International
GmbH in Heidelberg.



Tetsu Suzuki, B. Eng.
ist Entwicklungsingenieur
Turbolader-Definition bei der
IHI Charging Systems International
GmbH in Heidelberg.



Dipl.-Ing. Georgios Iosifidis, M. Sc.
ist Teamleiter Turbolader-Definition
bei der IHI Charging Systems Inter-
national GmbH in Heidelberg.



Dr.-Ing. Tobias Scheuermann
ist Abteilungsleiter Applikation
bei der IHI Charging Systems
International GmbH in Heidelberg.

Konzept mit frühem beziehungsweise spätem Schließen der Einlassventile genutzt. Eine Konsequenz aus dem Miller-Zyklus ist die Absenkung des volumetrischen Wirkungsgrads des Motors, was, bei Forderung konstanter Leistung, zu einem erhöhten Ladedruckbedarf führt. Die Auslegung konventioneller Turbolader (ATL) mit Wastegate (WG) ist bezüglich der Geschwindigkeit des Ladedruckaufbaus bei niedrigen Drehzahlen und der erreichbaren Leistung in diesen Fällen kompromissbehaftet. Turbolader mit variabler Turbinen-

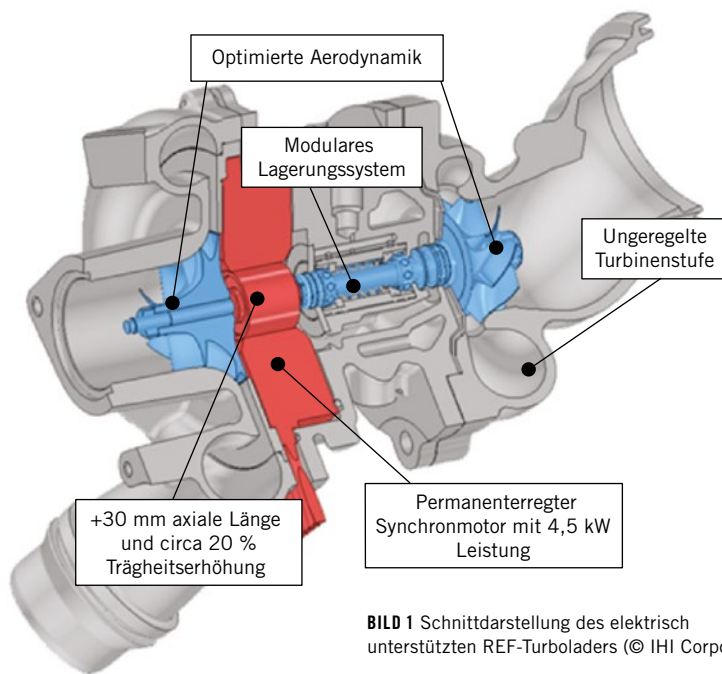


BILD 1 Schnittdarstellung des elektrisch unterstützten REF-Turboladers (© IHI Corporation)

geometrie (Variable Geometry System, VGS) sind in der Lage, diesen Zielkonflikt zu entschärfen. Ihre technische Ausführung ist allerdings komplex und unter ottomotorischen Bedingungen herausfordernd. Auch ihr Wirkungsgrad ist durch den weiten Betriebsbereich eingeschränkt [1, 2], sodass die Elektrifizierung des Antriebsstrangs großes Potenzial zur weiteren Milderung der beschriebenen Zielkonflikte bietet. Die Elektrifizierung kann in Verbindung mit einfachen, optimierten Aufladesystemen einen großen Beitrag zur Verbesserung der motorischen Effizienz leisten. Das Konzept des elektrifizierten Aufladesystems namens e-xR von IHI zielt insbesondere auf hybridisierte Antriebsstränge mit hocheffizienten Ottomotoren ab, die im Miller-Zyklus arbeiten.

ELEKTRISCHES AUFLADEKONZEPT

Das Aufladekonzept basiert auf einem unregelmäßig, elektrisch unterstützten Turbolader, bei IHI als REF bezeichnet, mit sehr guten aerodynamischen Wirkungsgraden der Hauptkomponenten [1]. In Verbindung mit einer durchsatzgesteigerten, wastegatelosen Turbine wird über eine Anhebung des Miller-Grads und des Verdichtungsverhältnisses ein verbesserter thermodynamischer Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors ermöglicht. Der unregelmäßige Betrieb wird durch eine Anpassung des Miller-

Niveaus erreicht. Dazu werden die Steuerzeiten so geändert, dass der Ladedruck und die resultierende Verdichterleistung auf den Wert steigen, der exakt der erzeugten Turbinenleistung unter unregelmäßigen Bedingungen entspricht. Dynamische Nachteile des Aufladesystems werden dabei mittels der elektrischen Unterstützung kompensiert. Der Elektromotor des Turboladers ist zwischen Lagerung und Verdichterrad platziert, um eine thermische Entkopplung von der heißen Turbinenseite sowie eine einfache Montage in der Fertigung zu erreichen. Der prinzipielle Aufbau ist in **BILD 1** dargestellt.

Die unregelmäßige Turbinenstufe erfordert eine alternative Lastregelung, die als Drosselklappenregelung und/oder teil- beziehungsweise vollvariabler Ventiltrieb ausgeführt sein kann. Auch die Rekuperation über den Motor des Turboladers kann in bestimmten Grenzen genutzt werden, hat jedoch Einfluss auf das Energiemanagement des Fahrzeugs. Eine weitere, attraktive Lösung bietet die Regelung mittels externer gekühlter Niederdruck-Abgasrückführung (ND-AGR). Sie kann der Lastregelung dienen und gleichzeitig den Kraftstoffverbrauch signifikant reduzieren. Ihre Kombination mit dem Konzept der elektrisch unterstützten Aufladung ist daher ideal, aber nicht zwingend notwendig. Die technischen Herausforderungen sind insbesondere bei Fahrzeugen groß, bei denen hohe

Anforderungen an die Dynamik des Verbrennungsmotors gestellt werden.

METHODIK

Zur Quantifizierung der Potenziale des e-xR-Konzepts wird im Folgenden ein thermodynamischer Vergleich moderner Aufladesysteme unter gleichen Randbedingungen sowie der Berücksichtigung gleicher Grenzwerte betrachtet. Die Auslegung der Aufladesysteme erfolgt auf Basis der multiobjektiven Optimierungsmethodik der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) von IHI, die in **BILD 2** dargestellt ist. DoE-Berechnungen mittels 1-D-Ladungswechselsimulationen durch das Programm GT-Power (Punkt a in **BILD 2**) bilden die Basis für die Erzeugung sogenannter Antwortflächen (Response Surfaces) verschiedener Motorparameter als Funktion der Einlassventil-Öffnungslänge (EVL), der Auslassventil-Öffnungslänge (AVL), des Verdichtungsverhältnisses (ϵ), der Ein- und Auslasssteuerzeit (EÖ, AS) und der Turboladerdimensionierung innerhalb des Optimierers (Punkt b in **BILD 2**). Mithilfe dieser Flächen können die Ventilsteuerzeiten für bestimmte Kombinationen aus EVL, AVL, ϵ und ATL-Komponentengrößen optimiert werden (Punkt c in **BILD 2**). Dieser Prozess wird für eine Reihe von Motorbetriebspunkten wiederholt (beispielsweise im Niedrigdrehzahl-

bereich zur Analyse des Drehmomentaufbaus (Low-end Torque, LET), bei Nennleistung und in der Teillast), um den besten Kompromiss aus EVL, AVL, ϵ und ATL-Komponenten für eine gegebene Zielfunktionen zu bestimmen (Punkt d in **BILD 2**).

Optimierungsparameter wie ein Downspeeding des Antriebs oder eine gesteigerte Hybridisierung werden nicht betrachtet. Der untersuchte Motor ist ein 2,0-l-Vierzylinder-Ottomotor mit Direkteinspritzung, einer Leistung von 160 kW bei 5000/min und einem Nenndrehmoment von 350 Nm bei 1500/min (LET). Das zugrundeliegende Fahrzeug aus dem E-Segment hat einen CO₂-Ausstoß von 152 g/km im WLTC (Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle). Die Reduktion der CO₂-Emissionen im Rahmen des WLTC wird mittels stationärer Simulation relevanter Betriebspunkte approximiert. Alle Varianten wurden unter Berücksichtigung der Systemgrenzen auf die Parameterkombination (EVL etc.) optimiert, die das Miller-Niveau und somit den Wirkungsgrad des Motors maximiert. Gleichzeitig muss ein Drehmomentansprechverhalten (Time-to-Torque) von $\leq 2,0$ s von 2 bar p_{me} auf 90 % des LET erreicht werden. Als Grenzwerte finden die maximal zulässige Turboladerdrehzahl, eine Temperatur nach Verdichter von 190 °C, ein Fanggrad $> 0,97$ in allen Betriebspunk-

ten, eine ND-AGR-Rate von maximal 30 % und die Nennleistung des Motors Berücksichtigung. Die Steuerzeiten werden zur Vermeidung von Kollisionen der Ventile untereinander beziehungsweise der Ventile mit den Kolben begrenzt.

Die Auslegungsvarianten umfassen eine konventionelle WG-geregelte Twin-Scroll-Turbine (TS) und eine Double-Scroll-Turbine mit Flutenverbindungsventil (DS + SCV), eine hocheffiziente VGS-Turbine sowie einen WG-geregelten Monoscroll-REF-Turbolader. Im fortschrittlichen e-xR-Konzept ist die Turbine an sich ungeregelte, die Regelung wird im gesamten Kennfeld durch die ND-AGR realisiert. Das VGS als schon etablierte, konventionelle Technologie im betrachteten Marktsegment wird ebenfalls mit ND-AGR bewertet, um einen gerechten Vergleich zu ermöglichen.

ERGEBNISSE

Die Vorteile im Bezug auf den spezifischen Kraftstoffverbrauch (Δb_e) in relevanten Betriebspunkten sowie die Verringerung des CO₂-Ausstoßes im Rahmen des WLTC sind in **BILD 3** dargestellt.

Wie zu erkennen ist, machen die betrachteten Systeme unterschiedliche Parameterkombinationen und damit variierende Miller-Grade realisierbar. Verglichen mit dem Basis-TS-ATL ermöglicht der DS-ATL mit SCV einen CO₂-Vorteil von circa 1 g/km, der aus dem leicht erhöhten Verdichtungsverhältnis resultiert. Das VGS ermöglicht eine Optimierung hin zu einer kürzeren EVL (150 °KW bei 1 mm Hub) und einem erhöhten Verdichtungsverhältnis (11,7) bei gleichzeitiger Verbesserung des Ansprechverhaltens um 55 %. Der resultierende CO₂-Vorteil beläuft sich auf 2 g/km. Beim elektrifizierten REF-ATL kann die Laderdynamik im Optimierungsprozess weitestgehend vernachlässigt werden, wodurch das Verdichtungsverhältnis (13,0) und die EVL (140 °KW) weiter optimiert werden können. Begrenzungen ergeben sich nun durch die Temperatur nach Verdichtung und die maximale ATL-Drehzahl. Der resultierende CO₂-Vorteil beträgt 3,6 g/km, bei gleichzeitiger Verbesserung der Dynamik um 74 %. Die Betrachtung mit gekühlter ND-AGR wurde für das VG- und das e-xR-System durchgeführt. Für das VGS wurde die ND-AGR-Rate bezüglich der Minimierung des spezifischen Verbrauchs

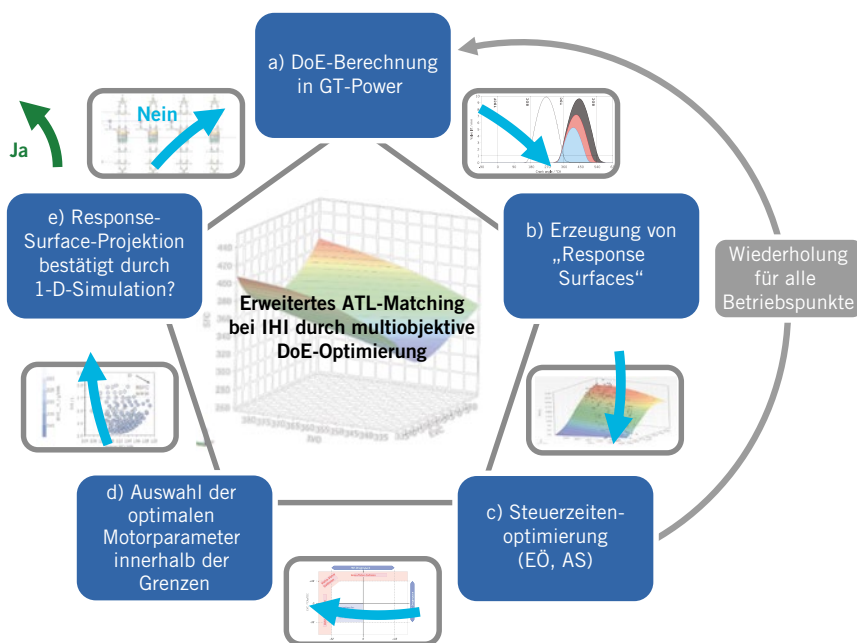


BILD 2 Entwicklung mittels multiobjektiver DoE-Optimierung (© IHI Corporation)

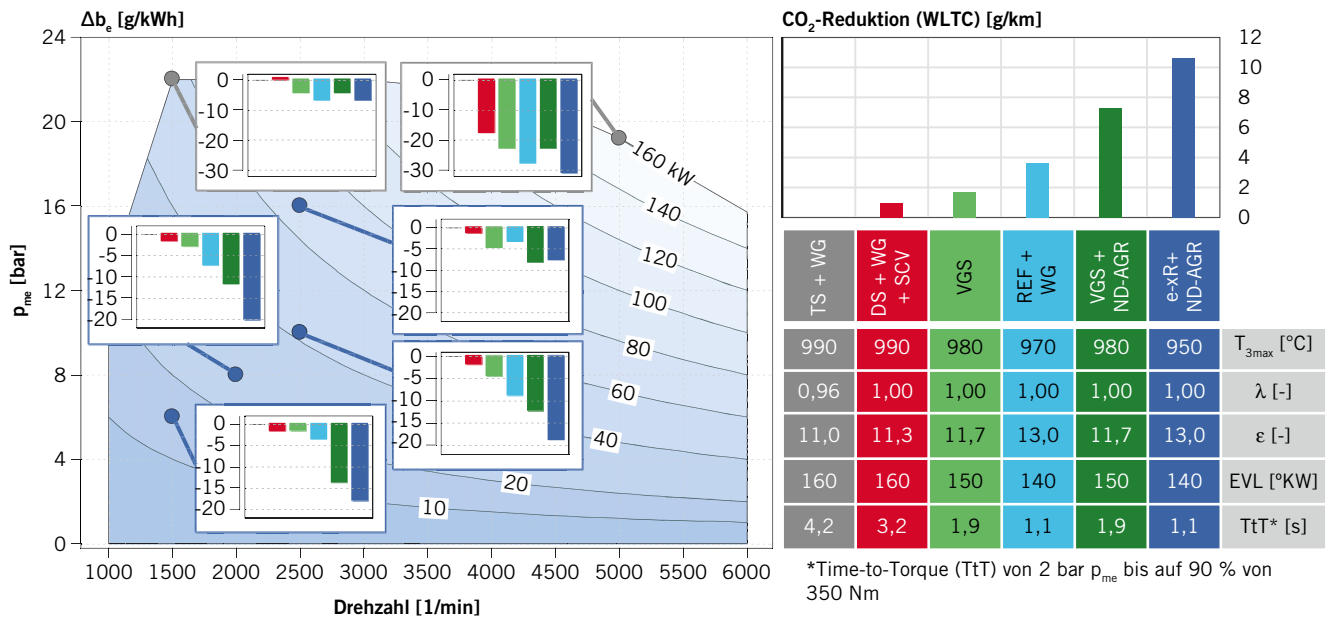


BILD 3 Untersuchungsergebnisse: Δb_e und CO₂-Reduktion im WLTC und optimierte Motorparameter (© IHI Corporation)

optimiert, wodurch sich ND-AGR Raten von bis zu 20 % in der Teillast ergeben. Höhere Werte sind nicht vorteilhaft, da die Verschlechterung des Ladungswechsels ($p_{mil,W}$) die Vorteile durch die ND-AGR überkompensiert. Dieser Effekt ist ein Resultat des verringerten VGS-Wirkungsgrads in stark geschlossenem Zustand. Der CO₂-Ausstoß kann vergli-

chen zum VGS ohne ND-AGR durch gekühlte ND-AGR um 5,5 g/km verringert werden. Für das e-xR-Konzept ergibt sich aufgrund der unregelmäßigen Turbinenwirkungswirkungsgrad und im Ladungswechsel. Somit sind Verbrauchsverbesserungen bis zur maximalen ND-AGR-Rate von 30 % zu beobachten, was in einer

weiteren CO₂-Reduktion von 7 g/km im Vergleich zum REF-ATL und > 3 g/km im Vergleich zum VGS mit ND-AGR resultiert. Aufgrund des hohen Miller-Grads mit dem REF-ATL beziehungsweise dem e-xR-System ergibt sich ein Luftaufwand < 0,5, bezogen auf den Zustand im Sammler, sowie ein Ladedruckbedarf von 3,3 bar. Gleichzeitig ermöglichen

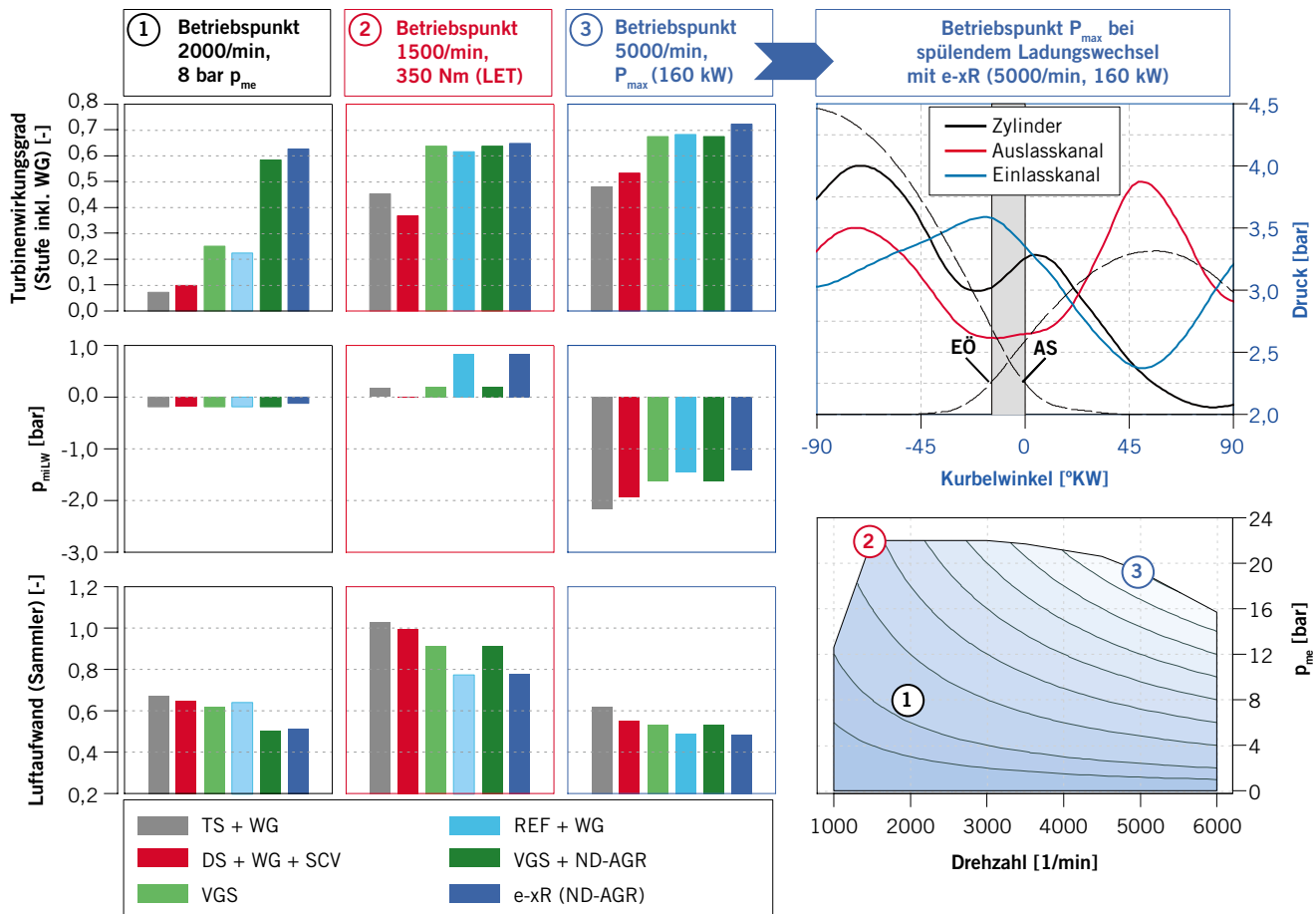


BILD 4 Kenngrößen des Ladungswechsels (© IHI Corporation)

der hohe Turbinenwirkungsgrad und der unregelmäßige Ansatz einen geringen Druck vor Turbine (p_3) von 3,1 bar, selbst unter Berücksichtigung eines Ottomotor-Partikelfilters. Ein spülender Ladungswechsel auch bei Nennleistung des Motors ist möglich, begrenzt wird er durch die Spätverstellung der Einlasssteuerzeit und eine einhergehende Reduzierung des Miller-Grads auf einen Fanggrad von 0,97. Dieser Sachverhalt wird, neben Turbinenwirkungsgrad, Luftaufwand und p_{milw} , in **BILD 4** verdeutlicht.

Ein zentraler Punkt bei der Verwendung elektrifizierter Aufladesysteme ist der elektrische Energiebedarf während des Fahrzyklus. Sowohl der REF-ATL als auch das e-xR-Konzept wurden so ausgelegt, dass der Elektromotor den Lader im WLTC zu keiner Zeit stationär antreiben oder bremsen muss. Im Volllastbereich bei niedrigen Drehzahlen zwischen 1000 und 2000/min muss mit bis zu 2 kW Wellenleistung unterstützt werden. Beide Systeme wurden durch die Kombination

aus optimierten Motorparametern und einer durchsatzgesteigerten Turbine so ausgelegt, dass die Nennleistung unter unregelmäßigen Bedingungen mit passivem Elektromotor erreicht wird. Die Durchmesser von Verdichter und Turbine einer solchen Auslegung sind nahezu identisch, der Durchsatz der Turbine liegt bei 80 % des Maximaldurchsatzes der VGS-Stufe. Mehr Details zur Lastregelung sind in **BILD 5** für drei Betriebspunkte dargestellt.

An der Vollast bei Motordrehzahlen zwischen 2500 und 4500/min wird der unregelmäßige Betrieb der elektrifizierten Systeme durch den minimalen Fanggrad von 0,97 begrenzt. Zur Lastregelung ist hierdurch ein WG-Anteil von maximal 5 % für den REF-ATL und eine ND-AGR-Rate von bis zu 10 % für das e-xR-Konzept erforderlich.

ZUSAMMENFASSUNG

Sowohl im Hinblick auf den spezifischen Verbrauch als auch den CO_2 -Ausstoß im

WLTC konnten für das e-xR-Konzept im Marktsegment von Ottomotoren mit einer spezifischen Leistung von 80 kW/l vielversprechende Vorteile aufgezeigt werden. Bei Anpassung, Zuhilfenahme der vorgestellten DoE-Optimierungsmethodik, ist das e-xR-Konzept aber nicht auf das betrachtete Marktsegment beschränkt. Die Idee der Elektrifizierung eines einfachen, wirkungsgradoptimierten Turboladers kann zur Verringerung des CO_2 -Ausstoßes in allen Motorklassen beitragen. Einen Überblick mit einer beispielhaften Marktsegmentierung nach Anforderungen an den Verbrennungsmotor und Eigenschaften des Antriebskonzepts gibt **BILD 6**.

Das vorgestellte, elektrisch unterstützte Aufladekonzept von IHI ist herausfordernd in Hinblick auf die Auslegung der ATL-Komponenten, die Elektrifizierung des Systems, die aggressive Miller-Strategie und die Nutzung der gekühlten ND-AGR zur teilweisen oder vollständigen Lastregelung. Ihr signifi-

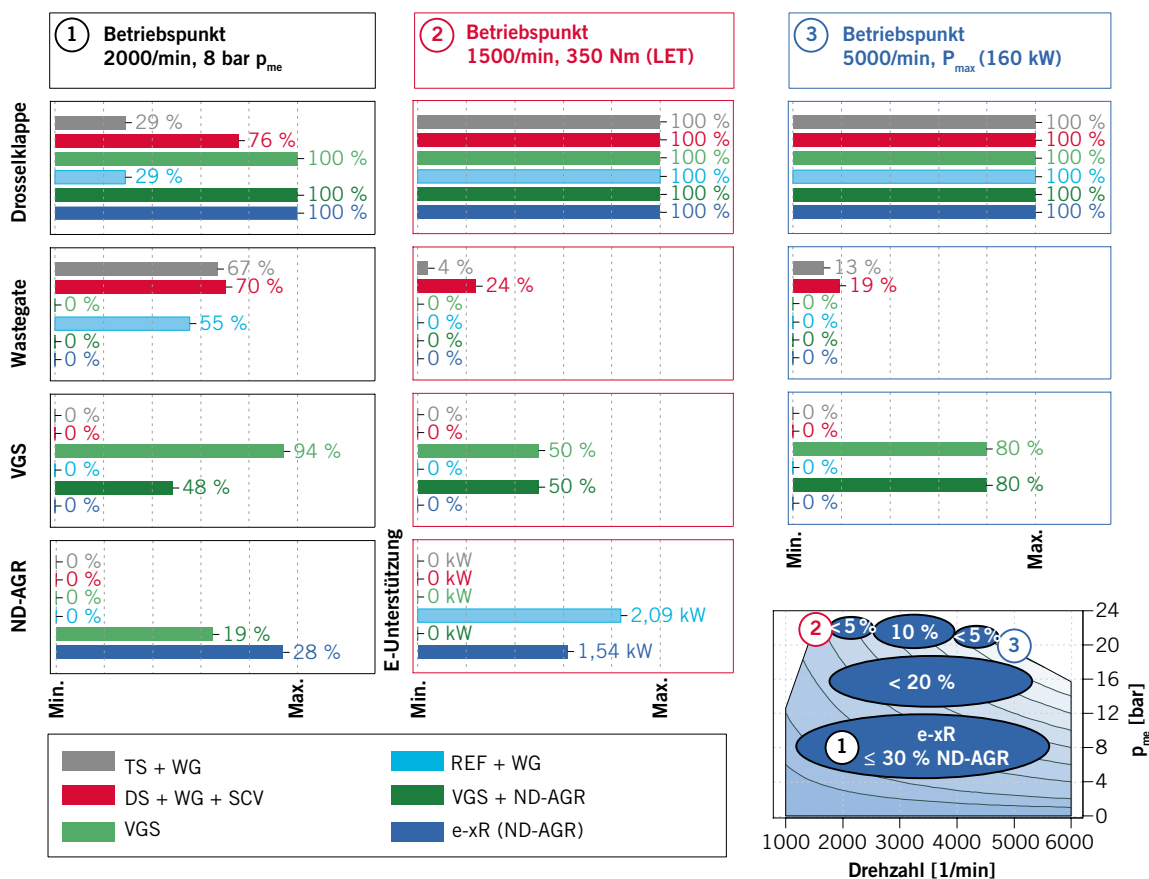


BILD 5 Regelungsparameter und ND-AGR-Raten beim e-xR-Konzept (© IHI Corporation)

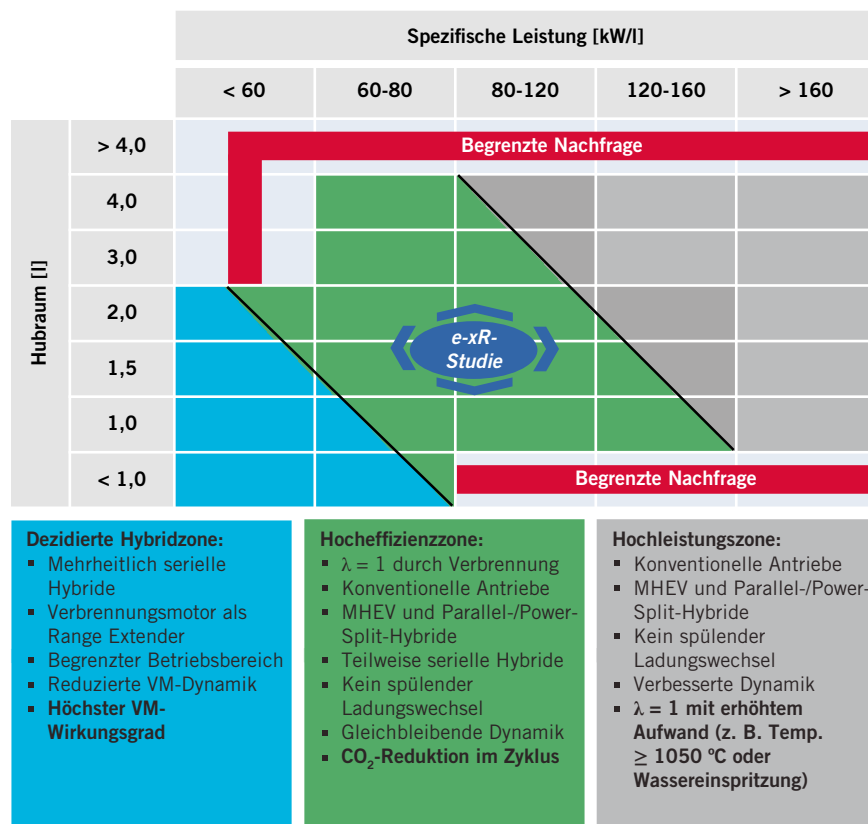


BILD 6 Marktsegmentierung bei aufgeladenen Ottomotoren (© IHI Corporation)

kantes Potenzial, Verbrauchsvorteile zu generieren, wird elektrifizierte Aufladesysteme zum Gegenstand weiterer marktübergreifender Systemuntersuchungen machen [3]. Die Elektrifizierung in Kombination mit neuen Technologien und Regelungsstrategien eröffnet zusätzliche Freiheitsgrade bei der Verbesserung des Verbrennungsmotors.

LITERATURHINWEISE

- [1] Starke, A.; Leonard, T.; Hehn, A.; Model, M.; Hoppe, L.; Kotzbacher, T.; Weiß, M.; Segawa, K.; Bamba, T.; Iosifidis, G.: The Next Generation of Variable Geometry Turbochargers from IHI. 23. Aufladetechnische Konferenz, Dresden, 2018
- [2] Starke, A.; Leonard, T.; DeSantis, R.; Filsinger, D.: The Evolution of Mixed Flow Turbochargers from IHI. 22. Aufladetechnische Konferenz, Dresden, 2017
- [3] Suzuki, T.; Hirai, Y.; Ikeya, N.: Electrically Assisted Turbocharger as an enabling technology for improved fuel economy in New European Driving Cycle operation. 11th International Conference on Turbochargers and Turbocharging, London, 2014



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
www.mtz-worldwide.com