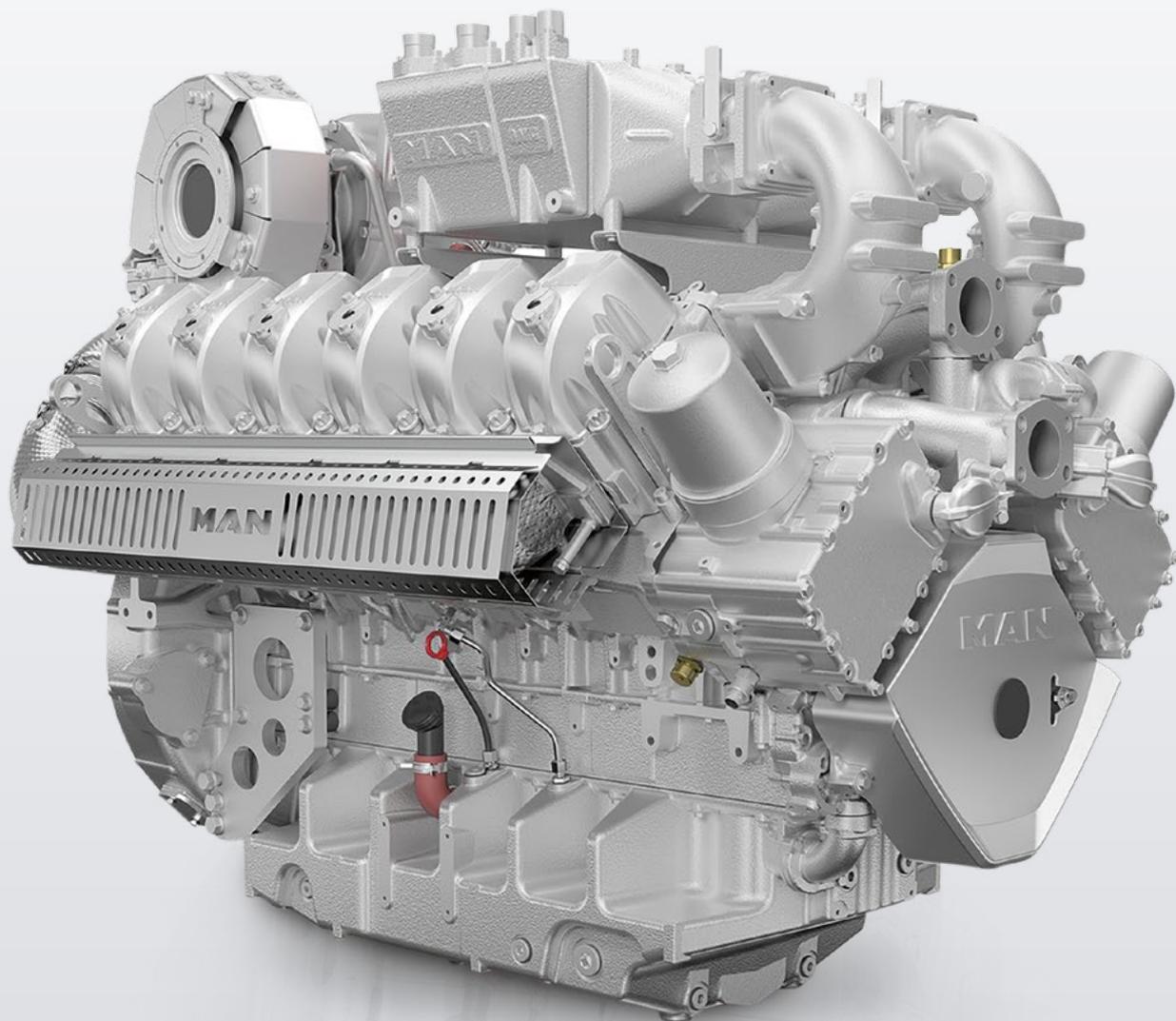


MTZ extra

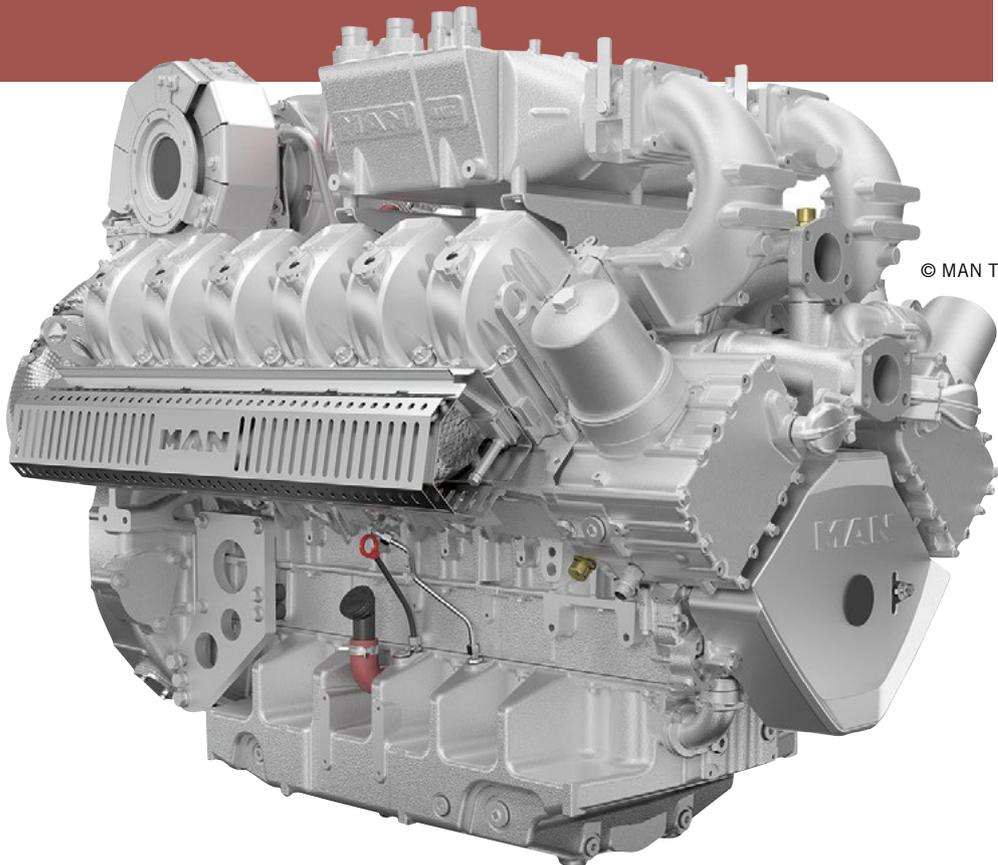


MAN E38

**Gasmotor mit hohem
Mitteldruck und Wirkungsgrad**



Der neue Zwölfzylinder-Stationärgasmotor MAN E38



© MAN Truck & Bus

Die Entwicklungsziele des neuen Stationärgasmotors E38 V12 von MAN waren marktführende Werte bezüglich des effektiven motorischen Wirkungsgrads und des Mitteldrucks in Verbindung mit einem sehr stabilen Motorlauf auch bei Niedrig-NO_x-Anwendungen. Neben den grundlegenden Änderungen an der Turboaufladung erwiesen sich Atkinson-Steuerzeiten mit spätem Einlassschließen als die beste Lösung, um allen Restriktionen und Prämissen dieses Entwicklungsprojekts erfolgreich zu begegnen. Mithilfe dieser Maßnahmen konnten ein hoher effektiver Wirkungsgrad von 44 % und ein Mitteldruck von 20 bar erreicht werden.

Mit dem E38 V12 hat MAN einen neuen Zwölfzylinder-Stationärgasmotor vorgestellt. Im Vergleich zum Vorgänger, dem MAN E32, ist das Einzelturboladerkonzept die wahrscheinlich prominente

Neuerung des neuen Aggregats [1]. Infolgedessen musste die Auslegung der Abgasanlage dem sogenannten 2-in-1-Prinzip folgen. Die Abgassammler konnten im Wesentlichen unverändert blei-

VERFASST VON



Dipl.-Ing. Thorsten Bachmann ist Konstruktionsingenieur für stationäre Gasmotoren bei der MAN Truck & Bus SE in Nürnberg.



Dipl.-Ing. Friedrich Menzinger ist Entwicklungsingenieur für stationäre Gasmotoren bei der MAN Truck & Bus SE in Nürnberg.



Manuel Stenglein, B. Eng. ist Konstruktions- und Entwicklungsingenieur für Marinemotoren bei der MAN Truck & Bus SE in Nürnberg.



Dr.-Ing. Philipp Wöhner ist Manager Entwicklung Stationäre Gasmotoren bei der MAN Truck & Bus SE in Nürnberg.

ben. Einzige Änderung ist eine Querschnittserhöhung, um der gesteigerten Leistung und dem damit höheren Massenstrom Rechnung zu tragen. Es wurde ein neuer Y-förmiger Abgaskrümmter modelliert, der direkt an den Turbolader montiert ist. Dieser wird durch zwei Kompensatoren mit den Abgassammlern verbunden und ist somit mechanisch sowie thermisch entkoppelt. Im Gegensatz zum E32-Stationärgasmotor wird der circa 100 kg schwere Turbolader nicht durch das Abgassystem selbst getragen, sondern steht auf einer soliden, in das Schwungradgehäuse integrierten Trägerstruktur. Um den Montageaufwand und vor allem das Risiko von Ölleckagen in der heißen Motorperipherie auf ein Minimum zu reduzieren, wird die Ölversorgung des Turboladers nicht durch ein externes Rohrsystem (Ölleitungen plus Armaturen) realisiert. Vielmehr befinden sich in der Tragkonstruktion zwei Ölbohrungen, die den Ölkanal des Kurbelgehäuses mit den Ein- und Auslassöffnungen des Turbolader-Lagergehäuses verbinden.

Aufgrund der Anforderungen der neuen Ölmodulgeneration und um das Konzept des integrierten Motorentlüftungssystems zu verlässen, musste dieses neu konzipiert werden. Die Entlüftung besteht nun aus einem Vorabscheider, der im Motor-V-Raum zwischen den beiden Zylinderbänken platziert ist, und einem Hauptabscheider (zweifacher Vliesabscheider), der direkt in den Ansaugkrümmer am Turboladereingang integriert wurde und so den einfachen Zugang im Servicefall gewährleistet.

In Bezug auf den Zylinderkopf galt die Prämisse, dass weiterhin ein einfaches Kipphebelwerk Verwendung finden und der Stoßeldurchtritt im Kurbelgehäuse unverändert bleiben sollte. Das geforderte Übersetzungsverhältnis und der bereits definierte Kühlmittelzu- und -rücklauf schränkten die Gestaltungsmöglichkeiten der Kipphebelbaugruppe weiter ein. Unter diesen Restriktionen wurde das endgültige Design in mehreren Iterationsschleifen entwickelt. Das Ergebnis ist ein um 20° gedrehter Ventilstern und die Einführung eines zweiten Einlasskanals, was zur Reduktion der Druckverluste im Zylinderkopf beiträgt, **BILD 1**. Eine weiterentwickelte, patentierte sogenannte Bottom-up-Kühlung ermöglicht eine effektive

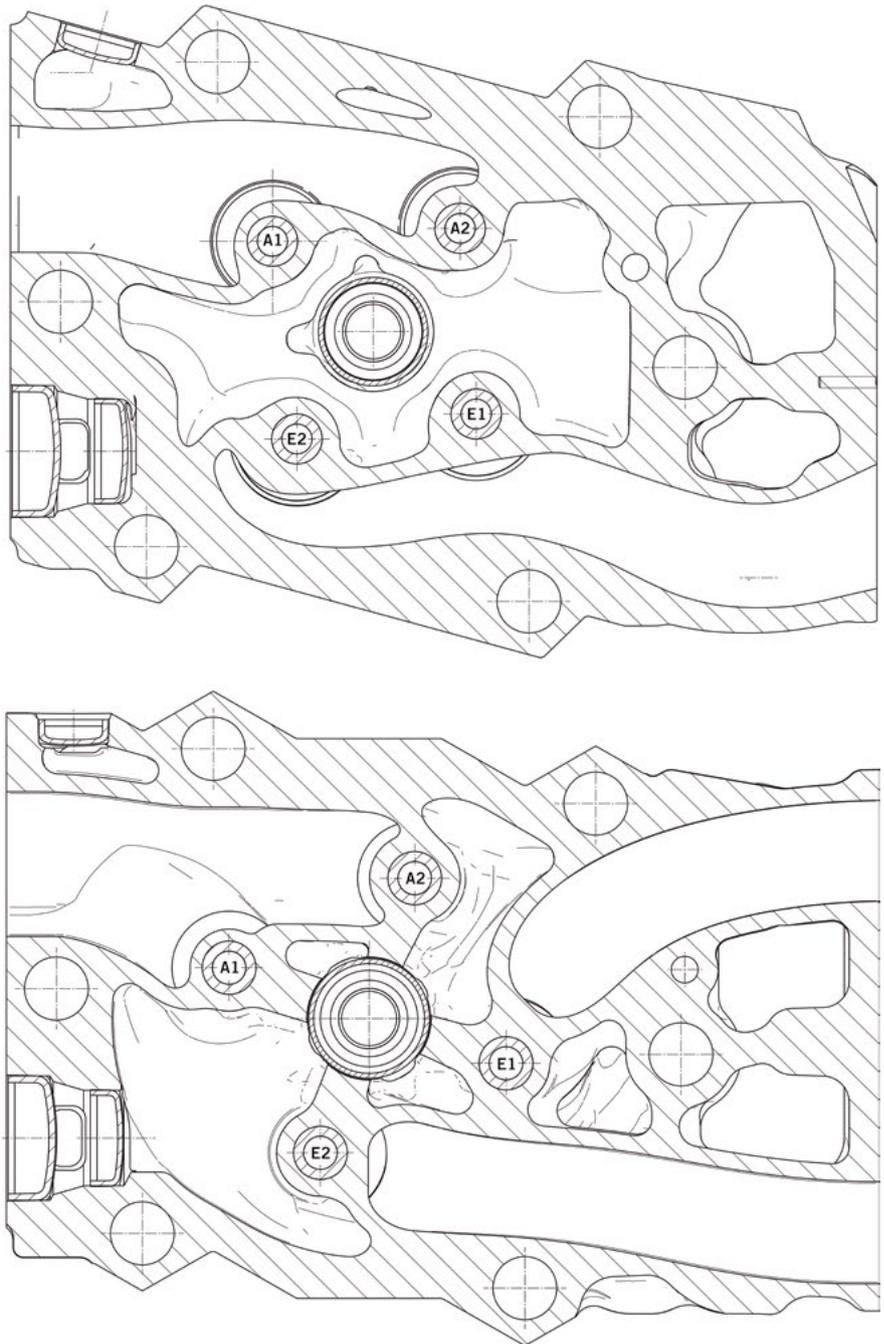


BILD 1 Querschnittsvergleich der Zylinderköpfe des E32 (oben) und E38 (unten) und Position der Einlass- und Auslassventile (E1, E2, A1, A2) © MAN Truck & Bus

Kühlung der hochbelasteten Auslass-Auslass- und Einlass-Auslass-Stege.

LADUNGSWECHSEL- UND VERBRENNUNGSANALYSE IN DER SIMULATION

Um den angestrebten effektiven Wirkungsgrad von 44 % beim neuentwickelten Motor zu erreichen, wurden im Vorfeld detaillierte Simulationsstudien

durchgeführt. Anhand dieser wurde deutlich, dass grundlegende Änderungen im Vergleich zum Vorgängermotor nötig sein würden. Im Einzelnen wurden die folgenden Kriterien untersucht:

- Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses
- kompakter/schnellerer Verbrennungsprozess
- Minimierung der Wärmeübertragung in der Expansionsphase

- Verbesserung/Verringerung der Ladungswechselarbeit.

Auf den ersten Blick sind diese Anforderungen teilweise widersprüchlich. Ein schneller Verbrennungsprozess kann zum Beispiel mit einem hohen Drall erreicht werden, aber dieser erhöht nicht nur die Wärmeübertragung in der Expansionsphase, sondern auch die Ladungswechselarbeit. Es musste also ein Weg gefunden werden, um alle genannten Faktoren gleichzeitig zu verbessern. Erreicht werden konnte dies schließlich durch einen verhältnismäßig geringen Grunddrall in Kombination mit einem Kolben mit hohem Quetschfaktor. Infolgedessen ist die Turbulenz (turbulente kinetische Energie) im oberen Verbrennungstotpunkt (Verbrennungs-OT) hoch, in der Expansionsphase jedoch deutlich reduziert.

EINHEITLICHES KANALDESIGN FÜR DIE DIESEL- UND GASANWENDUNG

Mithilfe von Methoden der numerischen 3-D-Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics, CFD) wurden stationäre Messungen der Einlass- und Auslasskanäle auf dem Komponentenprüfstand simuliert und die Drallzahl in Abhängigkeit vom Ventilhub bestimmt.

Aus Kostengründen war es von Anfang an das Ziel, sowohl für den neuen Gasmotor (E38) als auch für den neuen Dieselmotor (D38) ein identisches Zylinderkopf-Gussteil zu verwenden, das dem gleichen Baukastensystem angehört. Diese Prämisse gestaltete sich

herausfordernd, da die Verbrennungsauslegung moderner Dieselmotoren auf einem sehr niedrigen Drallniveau basiert, um die Wärmeübertragung zu minimieren. Exemplarisch ist das in **BILD 2** für die Dieselmotoren D26 und D28 dargestellt. Ottomotoren (beziehungsweise Motoren mit Flammenfrontverbrennung) erfordern jedoch ein höheres Maß an Ladungsbewegung und Turbulenz, um einen kompakten Brennverlauf zu realisieren, zumindest wenn sie nicht mit einer gespülten (aktiven) Vorkammer ausgestattet sind. Der E32-Stationärgasmotor dient als Beispiel für ein Hochdrallkonzept.

Der Zielkonflikt wurde dadurch gelöst, dass bei der Entwicklung der Einlasskanäle besonders auf die Drallzahl im Verhältnis zum Ventilhub geachtet wurde. Da im Fall des E38/D38 der Drall durch zwei Tangentialkanäle erzeugt wird, nimmt dieser mit dem Ventilhub stärker zu, als es bei einer spiralförmigen Kanalgestaltung der Fall wäre. Aufgrund des nahezu linearen Drallanstiegs über den Ventilhub war es möglich, das Drallniveau mittels Variation des maximalen Hubs und der Steuerzeiten einzustellen. Die resultierende Drallzahl für verschiedene Ventilhubprofile kann vereinfacht abgeschätzt werden, indem der Drall an Stützstellen mit definiertem Ventilhub mit der Kolbengeschwindigkeit gewichtet und über den Kurbelwinkel integriert wird. Selbst mit dieser vereinfachten Methode wird deutlich, dass der Drall für die Dieselanwendung durch Miller-Steuerzeiten (frühes Einlassschließen) reduziert werden kann. Bei der E38-

Atkinson-Variante (spätes Einlassschließen) für die Gasmotoranwendung ist ein Anstieg des resultierenden Dralls im Vergleich zu den Standardsteuerzeiten (füllungsoptimiert) zu erkennen. Der resultierende Drall für das Atkinson-Profil wird bei dieser Berechnung jedoch unterschätzt, da Ventilhub über 540 °KW bei der Integration nicht berücksichtigt werden.

Aufgrund des deutlich geringeren Drallniveaus im Vergleich zum Vorgängermotor E32 und der Einführung eines zweiten Einlasskanals konnte zudem ein geringerer Druckverlust erreicht werden, was zu einem >40 % höheren Einlass-Durchflusskoeffizienten führt.

SYSTEMAUSLEGUNG

Die Wahl des Turboladerverdichters hängt weitgehend vom Liefergrad des Motors ab. Um die Ladungswechselarbeit zu verbessern, wurden die Steuerzeiten hinsichtlich des Einlassschließens angepasst. Vereinfacht ausgedrückt, ist für eine bestimmte Leistung bei einem gewünschten Lambda (Luft-Kraftstoff-Verhältnis) ein bestimmter Luftmassenstrom erforderlich. Wird nun der Liefergrad gesenkt, steigt der Ladedruckbedarf. Wenn dies mit einem vertretbar geringen Anstieg des Abgasgedrucks (effektiver Strömungsquerschnitt und Wirkungsgrad der Turbine) und unter der Voraussetzung, dass der Wirkungsgrad des Verdichters konstant/hoch bleibt, erreicht werden kann, verbessert sich die Ladungswechselarbeit.

Diesem Vorgehen sind jedoch Grenzen gesetzt. Je geringer der Liefergrad ist, desto höher ist der Ladedruck, der erreicht werden muss und dem Komponenten wie der Ladegemischkühler standhalten müssen. Auch die Verdichter-Austrittstemperatur steigt deutlich an, insbesondere bei einstufiger Turboaufladung. Diese beiden Größen bestimmen in der Folge den minimal möglichen Liefergrad bei einer gewünschten Leistung.

Ein Überexpansionszyklus, wie der Miller- oder Atkinson-Zyklus, reduziert den Liefergrad. Wie bereits beschrieben, bestand ein Entwicklungsziel darin, einen kompakten Brennverlauf zu erreichen. Zu diesem Zweck sollte der Drall beim festgelegten Gas-/Dieselzylinderkopf – beziehungsweise mit den gemeinsamen Einlasskanälen – für den Gas-

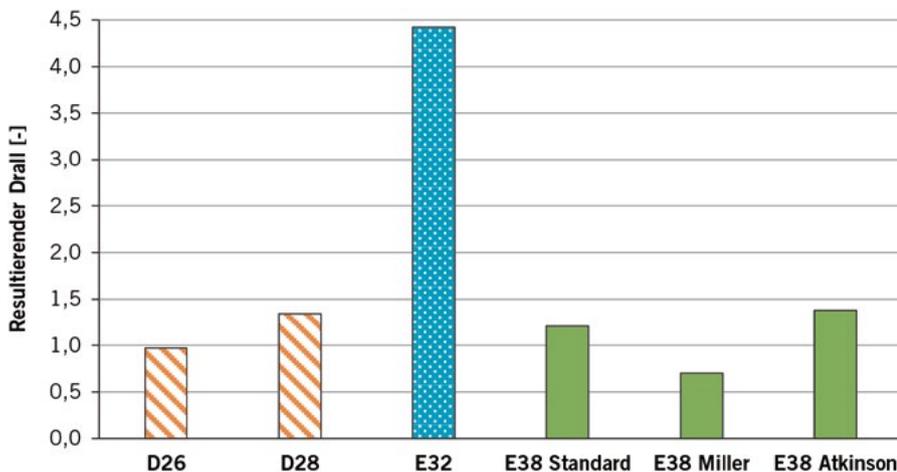


BILD 2 Drall verschiedener MAN-Motoren (D: Diesel; E: Gas) im Vergleich zum E38 mit unterschiedlichen Ventilsteuerzeiten (© MAN Truck & Bus)

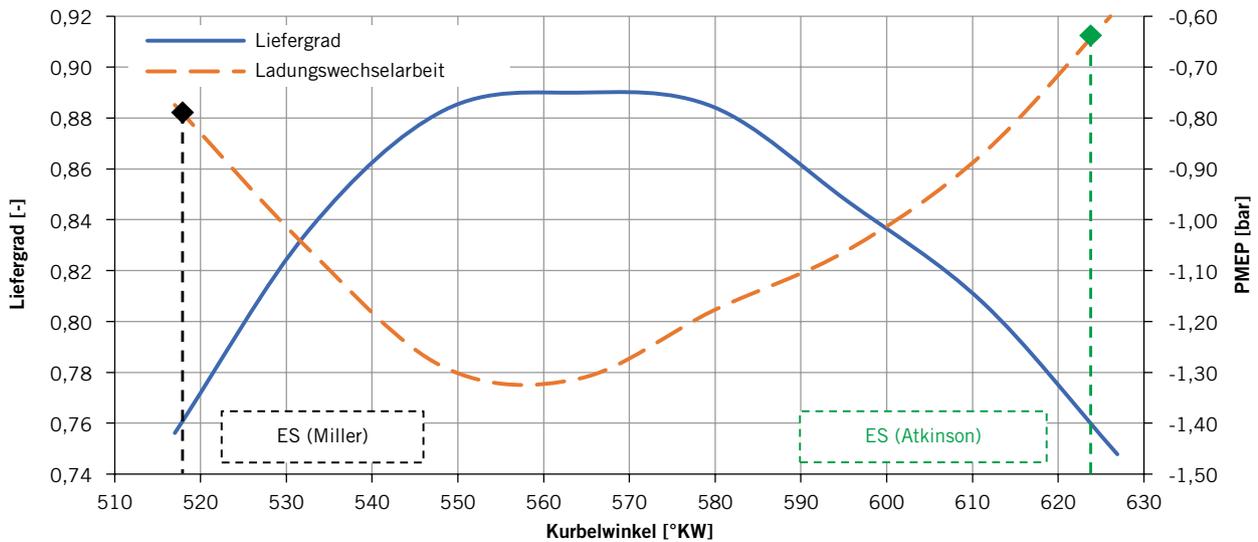


BILD 3 Ladungswechselarbeit (PMEP) versus Liefergrad für unterschiedliche Einlass-Schließt(ES)-Zeitpunkte (© MAN Truck & Bus)

motor maximiert werden. Wie oben ausgeführt, wird umso mehr Drall erzeugt, je größer der Ventilhub ist. Das bedeutet, dass mit dem Miller-Zyklus, aufgrund seiner kürzeren Ventilöffnungszeit, deutlich weniger Drall generiert werden kann als mit dem Atkinson-Zyklus.

Um den Einfluss der Einlasssteuerzeiten auf die Ladungswechselarbeit zu veranschaulichen, wurde eine 1-D-CFD-Stu-

die durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **BILD 3** dargestellt. Vergleicht man Miller-Steuerzeiten (schwarz, gestrichelt) und Atkinson-Steuerzeiten (grün, gestrichelt) bei einem Liefergrad von jeweils 0,76, so lässt sich feststellen, dass die Ladungswechselarbeit (Pumping Mean Effective Pressure, PMEP) mit Atkinson-Steuerzeiten weniger negativ ist, was den Wirkungsgrad des Motors erhöht.

Ein weiterer Vorteil der Überexpansionszyklen ist das geringere effektive Verdichtungsverhältnis und damit eine niedrigere Verdichtungsendtemperatur im Zylinder, was dazu beiträgt, anormale Verbrennungssphänomene wie Motorklopfen oder Frühzündung zu verhindern.

MESSKAMPAGNE AM EINZYLINDER- UND VOLLMOTOR

Um die Untersuchungen aus der CFD-Simulation zu validieren, wurden zahlreiche Prüfstandsläufe mit einem Einzylindermotor (Single Cylinder Engine, SCE) durchgeführt. Insbesondere die Ergebnisse bezüglich der Ventilsteuerzeiten und des Verdichtungsverhältnisses waren von Interesse. Neben der Kolben-Zylinder-Einheit wurden auch die Randbedingungen wie Ladedruck/Temperatur und Abgasgedruck entsprechend den Ergebnissen der Ladungswechselsimulation eingestellt, um die Bedingungen am Vollmotor richtig anzunähern. Im Folgenden wird eine Auswahl der Ergebnisse am SCE kurz diskutiert.

In **BILD 4** ist zu erkennen, dass unter Einhaltung des gleichen NO_x -Grenzwerts mit Miller-Steuerzeiten nicht der identische Verbrennungsschwerpunkt wie mit Atkinson-Steuerzeiten erreicht werden kann. Die höhere Ladungsbewegung und Turbulenz mit Atkinson-Steuerzeiten überkompensiert das höhere Lambda, das den Verbren-

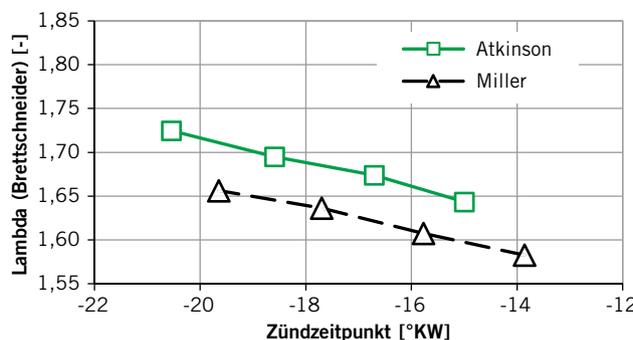
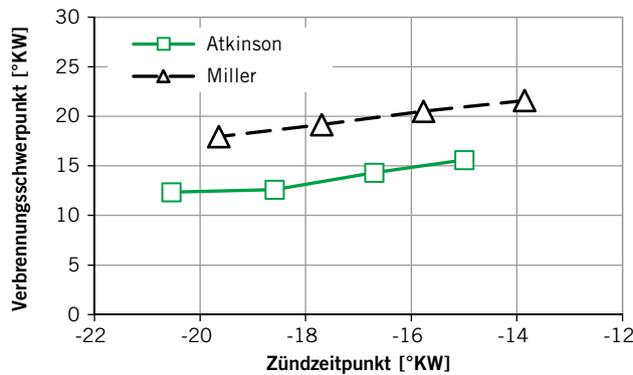


BILD 4 Verbrennungsschwerpunkt und Lambda des Einzylindermotors bei identischen NO_x -Emissionen (© MAN Truck & Bus)

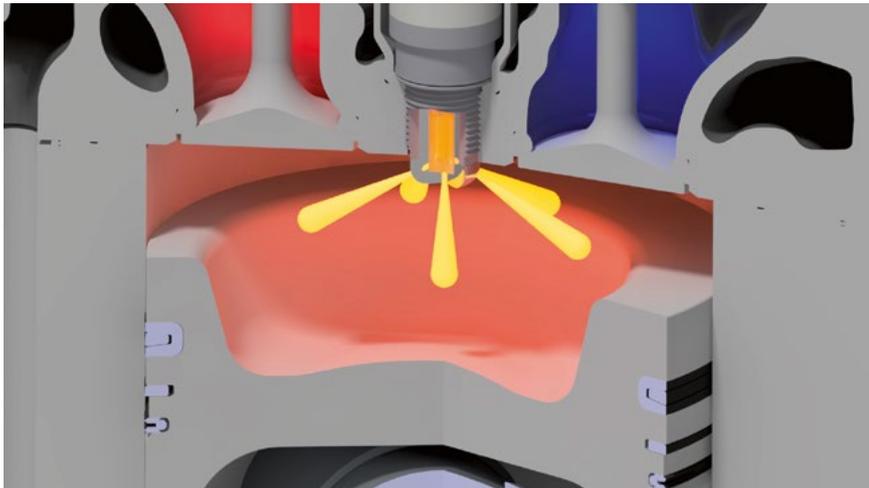


BILD 5 Vorkammerzündkerze mit Fackelstrahlen (© Multitorch)

nungsprozess verlangsamt. Selbst wenn man den frühesten dargestellten Zündzeitpunkt mit Miller- und den spätesten mit Atkinson-Steuerzeiten vergleicht und damit beide auf ein identisches Lambda-Niveau bringt, liegt der Verbrennungsschwerpunkt mit Miller-Steuerzeiten immer noch etwa 3 °KW später.

Hinsichtlich des auf den indizierten Mitteldruck bezogenen Variationskoeffizienten (COV_{IMEP}) wurden mit den Atkinson-Steuerzeiten, trotz eines höheren Lambdas, bis zu 0,8 %-Punkte niedrigere Werte festgestellt, was die vorteilhafte Ladungsbewegung und die daraus resultierenden besseren Zündbedingungen unterstreicht.

Die Einzylinderergebnisse schränken die Konfiguration für die Vollmotorversuche bereits auf ein einziges Verdichtungsverhältnis und eine Pleuellbogenkontur ein. Da sich die Atkinson-Ventilsteuerzeiten hervorragend bewährt hatten, stand somit die endgültige Auslegung für den ersten Vollmotorprototyp fest.

Für die Tests am Vollmotor standen eine Zylinderinnendruckindizierung auf allen zwölf Zylindern sowie verschiedene Zündsysteme und Motorsteuerungen zur Verfügung. Die Gasverbrauchsmessung wurde redundant mit zwei verschiedenen Messsystemen durchgeführt, um eine hohe Messsicherheit

bezüglich des berechneten Motorwirkungsgrads sicherzustellen.

Die Versuche am Vollmotor bestätigten die Leistungsfähigkeit der am Einzylindermotor vorselektierten Komponenten und bildeten somit eine solide Ausgangsbasis für die Anpassung und Optimierung der passiven Vorkammerzündkerzen, die bereits für den E32-Vorgängermotor verwendet wurden, **BILD 5**. Nach mehreren Optimierungsläufen wurde eine Steigerung des Motorwirkungsgrads von >1 %-Punkt und eine Verringerung des COV_{IMEP} um rund 45 % im Vergleich zu einer Standard-Hakenzündkerze am E38 erreicht. Die minimalen NO_x -Emissionswerte bei einem definierten COV_{IMEP} konnten mit der finalen Vorkammerzündkerze halbiert werden.

FAZIT UND AUSBLICK

Die Gasmotorenbaureihe E38 ist nicht nur eine hubraumerweiterte Version des E32, sondern hat grundlegende Änderungen in Bezug auf die Aufladung, den Ladungswechsel und das Brennverfahren erfahren. Die Erkenntnisse aus dem langjährigen Betrieb der E32-Baureihe sind in die Entwicklung miteingeflossen, und es wurden weitere robustheitssteigernde Maßnahmen ergriffen, um der höheren Maximalleistung beziehungsweise dem gesteigerten

Mitteldruck Rechnung zu tragen. Durch die Atkinson-Steuerzeiten ist es zudem gelungen, das gleiche Zylinderkopf-Gussteil für den Diesel- und den Gasmotor zu verwenden, ohne den Wirkungsgrad des Gasmotors zu beeinträchtigen.

Aufgrund der großen Anzahl gemeinsamer Teile konnten wichtige Aspekte der Validierung des Dieselmotors auf den Gasmotor übertragen werden, wodurch der Validierungsprozess des Gasmotors nicht nur konsolidiert, sondern auch in seinen Anforderungen erweitert wurde.

Der umfassende Einsatz von Simulationen und die Validierung der Ergebnisse am Einzylindermotor waren der Schlüssel zum Erreichen eines effektiven Motorwirkungsgrads von 44 % am Vollmotor. Der auf 29,6 l vergrößerte Hubraum in Kombination mit einem Mitteldruck von 20 bar führt zu einer Leistung von 735 kW bei 1500/min und 840 kW bei 1800/min. Damit stellt der E3872 LE einen bedeutenden Entwicklungsschritt in der Zwölfzylinderklasse der MAN-Gasmotoren dar und bietet eine hervorragende Basis für zukünftige Derivate, sei es für andere Leistungsklassen oder den Betrieb mit alternativen Kraftstoffen wie Wasserstoff, Methanol oder Ammoniak.

LITERATURHINWEIS

[1] Wöhner, P. et al.: The new E38 MAN stationary gas engine for power and heat generation. 18. Internationale MTZ-Konferenz Heavy-Duty-, On- und Off-Highway-Motoren, Nürnberg, 2023

DANKE

Besonderer Dank der Autoren gilt den Mitarbeitenden aus der Thermodynamiksimulation, Dipl.-Ing. (FH) Martina Leistner und Dipl.-Ing. Thomas Malischewski, für ihre Beiträge zu diesem Artikel.

IMPRESSUM

Sonderausgabe 2024 in Kooperation mit MAN Truck & Bus SE, Vogelweiherstraße 33, 90441 Nürnberg; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Postfach 1546, 65173 Wiesbaden, Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754, USt-IdNr. DE81148419

GESCHÄFTSFÜHRER:

Stefanie Burgmaier | Andreas Funk | Joachim Krieger

PROJEKTMANAGEMENT: Anja Trabus

TITELBILD: © MAN Truck & Bus

MAN Truck & Bus SE
Vogelweiherstr. 33
90443 Nürnberg
man-engines@man.eu
www.man-engines.com

MAN Truck & Bus – Ein Mitglied der TRATON GRUPPE