

MTZ

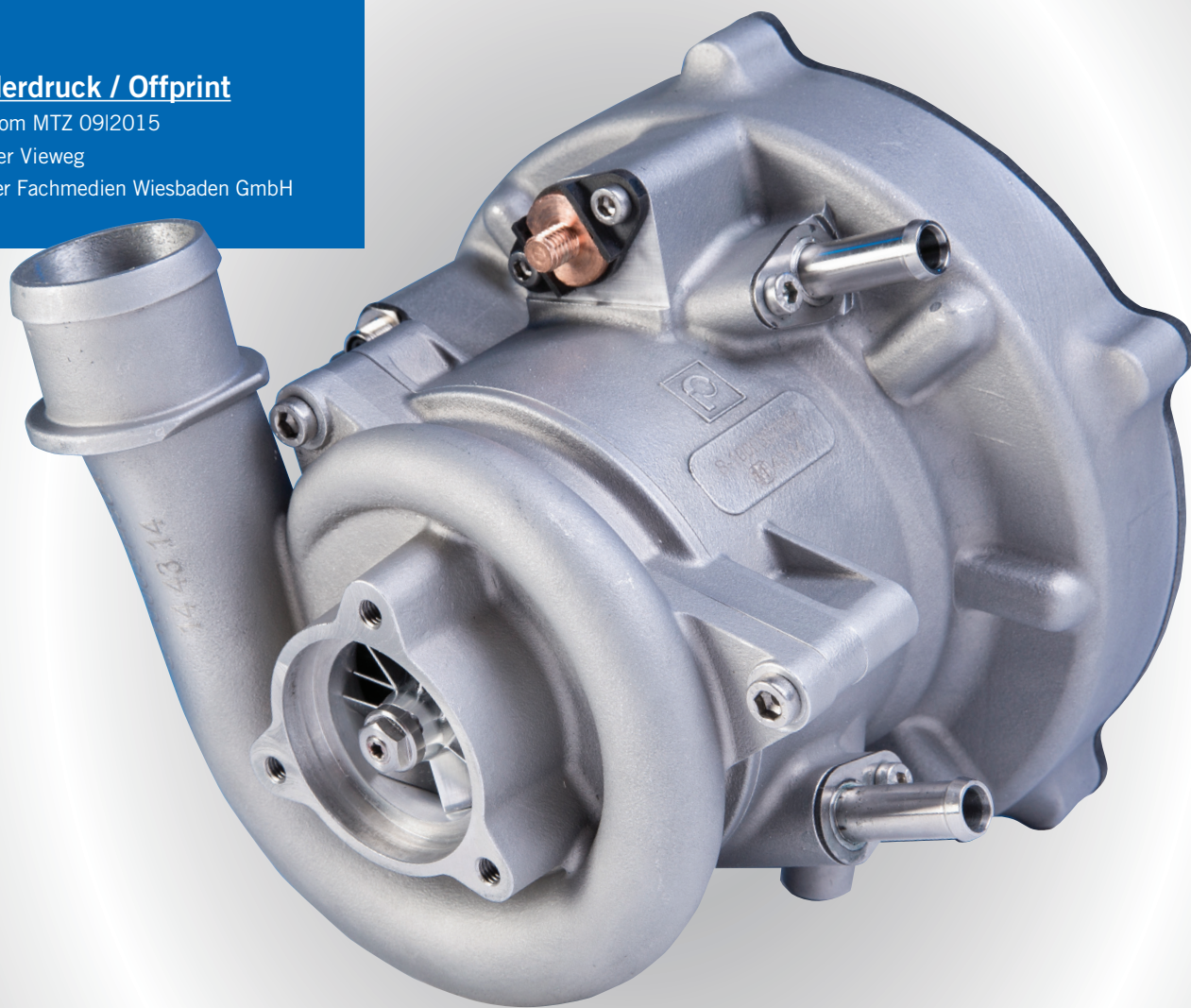
09 September 2015 | 76. Jahrgang

Sonderdruck / Offprint

aus / from MTZ 09|2015

Springer Vieweg

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH



**DER ELEKTRISCHE VERDICHTER –
HERAUSFORDERUNG, KONZEPTION UND UMSETZUNG**

**THE ELECTRIC SUPERCHARGER –
CHALLENGE, CONCEPTION AND IMPLEMENTATION**

MTZ

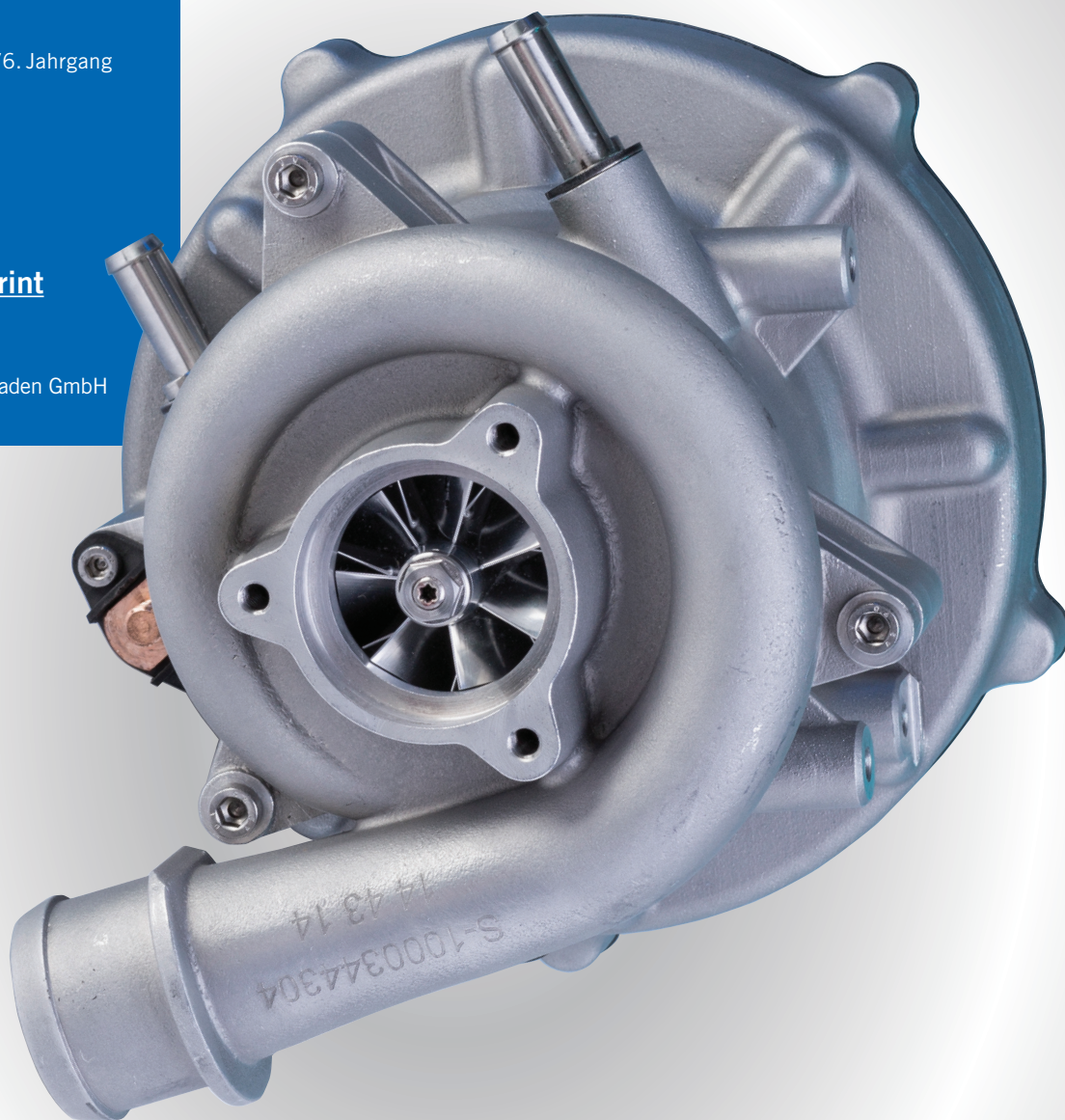
09 September 2015 | 76. Jahrgang

Sonderdruck / Offprint

aus / from MTZ 09|2015

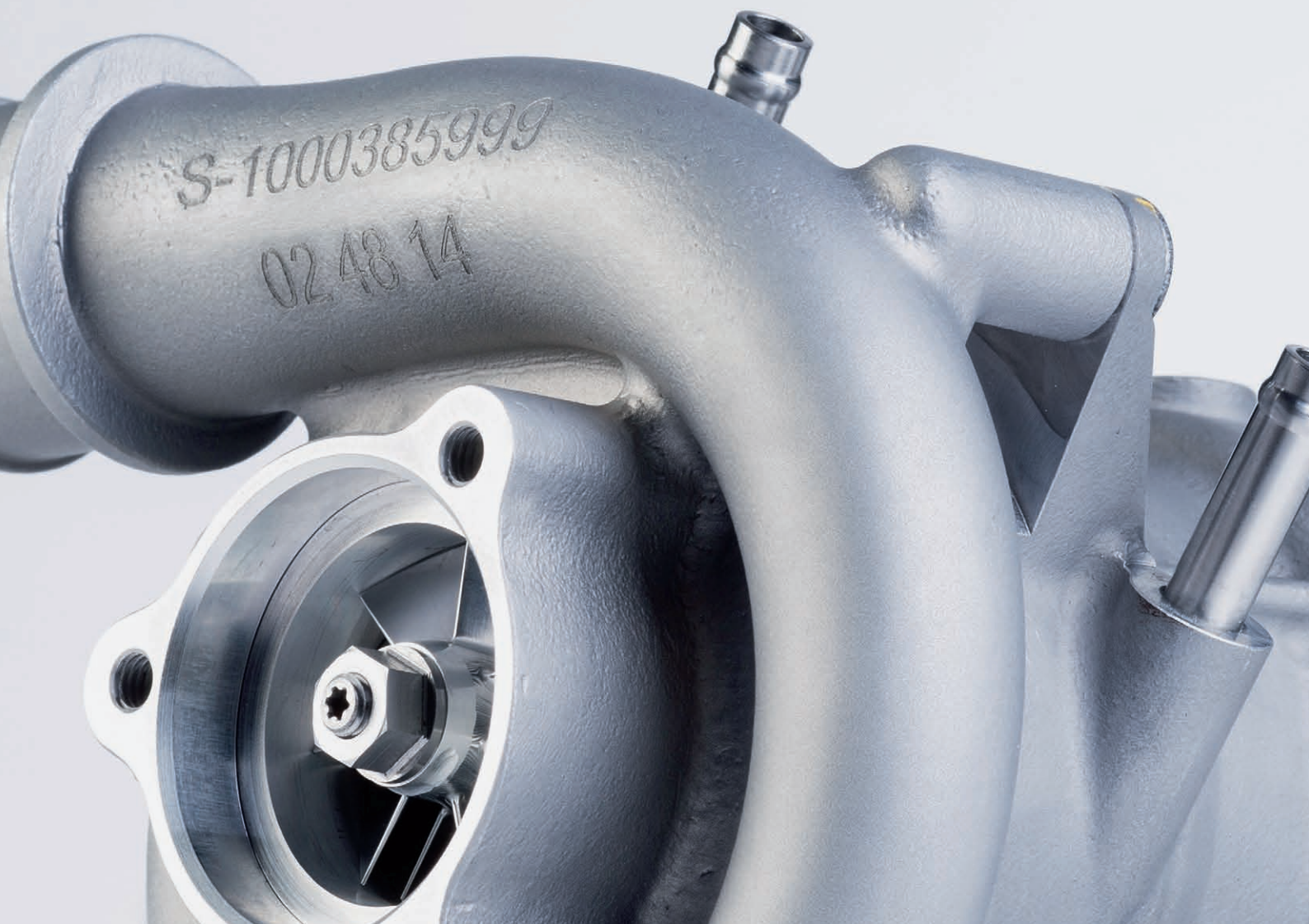
Springer Vieweg

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH



**DER ELEKTRISCHE VERDICHTER –
HERAUSFORDERUNG, KONZEPTION UND UMSETZUNG**

**THE ELECTRIC SUPERCHARGER –
CHALLENGE, CONCEPTION AND IMPLEMENTATION**



Der elektrische Verdichter

Herausforderung, Konzeption und Umsetzung

Ein elektrischer Verdichter ermöglicht die Reduzierung der CO₂- und der Schadstoffemissionen bei gleichzeitig erheblicher Verbesserung der Fahrbarkeit und des subjektiven Fahrerlebnisses. Vor dem Hintergrund der vorhandenen technischen Herausforderungen stellt die Pierburg GmbH ihren im Haus entwickelten elektrischen Verdichter vor.

AUTOREN



Dipl.-Ing. Stefan Rothgang
ist Abteilungsleiter für Nebenaggregate und alternative Antriebe in der Vorentwicklung bei der Pierburg GmbH in Neuss.



Dipl.-Ing. Michael Pachmann
ist Leiter der Business Unit Emission Controls bei der Pierburg GmbH in Neuss.



Dipl.-Ing. Sven Nigrin
ist Elektronik-Entwicklungsingenieur für Nebenaggregate und alternative Antriebe in der Vorentwicklung bei der Pierburg GmbH in Neuss.



Markus von Scheven, M. Sc.
ist E-Motoren-Entwicklungsingenieur für Nebenaggregate und alternative Antriebe in der Vorentwicklung bei der Pierburg GmbH in Neuss.

ELEKTRISCH GESTÜTZTE MOTORAUFLADUNG

Endkunden geben neben erfahrbaren Merkmalen wie der Beschleunigung und der Leistungsentfaltung vor allem einen niedrigen Kraftstoffverbrauch als Kriterium beim Kauf eines Neuwagens an. Dies und weiter abgesenkte Grenzwerte für den CO₂-Ausstoß von 130 auf 95 g/km stellen die zentralen Herausforderungen der Hersteller bei der Entwicklung von Fahrzeugen und deren Antriebssträngen dar.

Galten diese Gesamtentwicklungsziele lange Zeit als kaum miteinander vereinbar, bietet der Paradigmenwechsel vom singular antreibenden Verbrennungsmotor zu einem teilelektrifizierten Antrieb ganz neue Gestaltungsmöglichkeiten.

Dementsprechend in der Spannungslage und Stromtragfähigkeit angepasste Bordnetze machen den Einsatz leistungstarker mechatronischer Komponenten möglich, die flexibel und vom Betriebszustand des Verbrennungsmotors unabhängig betrieben werden können. Downsizing- und DownsPEEDING-Konzepte nutzen diese Flexibilisierung im Rahmen einer Teilelektrifizierung der Aufladung, in der die konventionelle Aufladeinheit um einen rein elektrischen Verdichter ergänzt wird. Ein erheblich beschleunigter Ladedruckaufbau aus niedrigen Drehzahlen ist die Folge. Das so abrufbare hohe Drehmoment lässt eine Leistungscharakteristik erfahren, die bisher allein von rein elektrischen Antrieben bekannt war [1, 2, 3].

Aufgrund des sich darstellenden Marktpotenzials hat die Pierburg GmbH als etablierter Anbieter von 12-, 48-V- und Hochvolt-Strömungsmaschinen ihr Produktportfolio um einen elektrischen Verdichter, den sogenannten electric Air Charger (eAC), erweitert. Die sich bei der Entwicklung des eAC stellenden Herausforderungen sowie die Lösungsansätze und Differenzierungsmerkmale sollen im Nachfolgenden näher erläutert werden.

POSITIONIERUNG DES ELEKTRISCHEN VERDICHTERS IM LUFTPFAD

Der eAC bietet die Möglichkeit einer freien und allein an den technischen Erfordernissen ausgerichteten Positionierung im Luftpfad. Vergleichsweise kurze, temporäre Einsätze zur schnellen



Bereitstellung von Ladedrücken kennzeichnen den Einsatzbereich der Komponente und machen sie so zum idealen Bestandteil einer mehrstufigen Aufladung. Die zeitlich begrenzte Betriebsweise des elektrischen Verdichters macht den Einsatz einer parallel angeordneten Bypassierungseinrichtung sinnvoll, die den elektrischen Verdichter entweder in Reihe zum ATL verschaltet oder aber die Luft direkt, ohne den Weg über den eAC, zum Motor führt.

BILD 1 zeigt an einer vereinfachten Ansaugluftstrecke mögliche Einbaupositionen des eAC auf, die in einer Matrix bewertet werden. Jede Einbauposition weist vor- und nachteilige, teilweise konträr ausgeprägte Effekte in der Wechselwirkung von Komponente und Verbrennungsmotor auf. Neben der verbesserten, saugmotorähnlichen Lastannahme und verminderter Rohemissionen durch angepasste Motorluftverhältnisse sind je nach Position erhöhte Abgasrückführaten erzielbar. Ferner lässt sich der Gesamtwirkungsgrad des elektrischen Verdichters in den Positionen 3 und 4 durch die Möglichkeit, die Verdichterkennfelder schmäler auszuführen, positiv beeinflussen. Früh in der Konstruktionsphase des eAC sind zudem mögliche bauteilbelastende hohe Luftdrücke und Lufttemperaturen zu berücksichtigen. Ebenso sind die Abscheidungen des Gleitlagerungssystems einer vorgeschalteten Aufladeinheit und Blow-by-Gase mit Bestandteilen aus Motoröl, Kraftstoff und Wasserdampf bauteilkritisch. Gleiches gilt für Einträge aus der ND-AGR-Strecke mit Sedimenten aus GPF/DPF-Systemen sowie korrosiven Reagenzien.

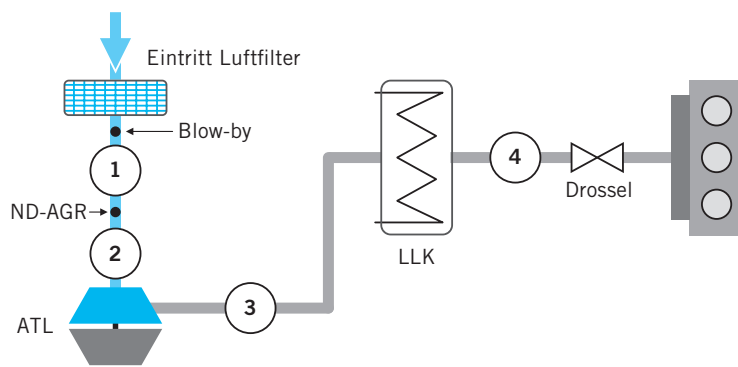
ZIELPARAMETER DER KONSTRUKTIVEN GESTALTUNG

Ein möglichst hoher Nutzwert eines elektrischen Verdichters bemisst sich an folgenden Zielvorgaben:

- hohe Winkelbeschleunigungen/ Drehzahlgradienten
- hohe aerodynamische Förderleistungen/hoher Gesamtwirkungsgrad
- kleinstmögliche Bauabmaße
- niedrige Bauteilkosten.

Zudem ist die Funktionalität über die gesamte Motorlebensdauer von bis zu 15 Jahren und 300.000 km abzusichern.

Gemäß Gl. 1 setzt der eAC die ihm zur Verfügung gestellte Energie in ein



Merkmal	Position			
	4	3	2	1
Transientverhalten des Verbrennungsmotors	++	+	0	0
Mittleres $\eta_{\text{Verdichter}}$	++	+	-	0
Potenzial zur Emissionsreduktion	++	+	0	-
Reagenzienbelastung/Korrosionsgefahr/Lackbildung eAC	0	-	+	++
Thermomechanische Belastung eAC	0	-	+	++

BILD 1 Mögliche Positionen des elektrischen Verdichters im Luftpfad

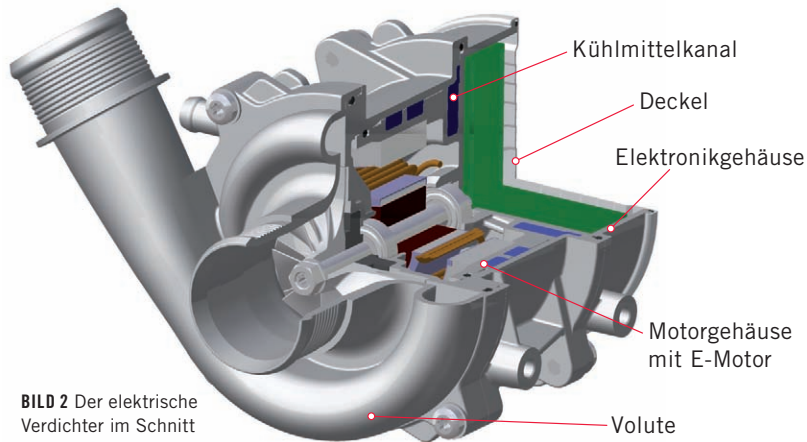


BILD 2 Der elektrische Verdichter im Schnitt

Wellenmoment um, das in transienten Phasen in die Beschleunigung und Förderleistung einfließt:

$$\text{Gl. 1} \quad \begin{aligned} M_{E\text{-Motor}} &= M_{\text{Förder}} + M_{\text{Beschleunigung}} \\ \text{mit} \\ M_{\text{Beschleunigung}} &= J \cdot \dot{\omega} \end{aligned}$$

Die Massenträgheit des rotierenden Systems, bestehend aus Rotoreinheit und Verdichterrad, erweist sich als die zentrale Größe zur Erzielung hoher Rotorbeschleunigungen. Das Verdichterrad zeigt dabei das größte Potenzial zur Minderung der Massenträgheit, sodass dessen konstruktive Gestaltung und Dimensionierung daran auszurichten sind. Untersuchungen untermauern die Radauslegung auf hohe Nenndrehzahlen zur Erzielung einer geringen T_{90} -Beschleunigungszeit

(T_{90} entspricht hierbei der Zeitdauer, die der elektrische Verdichter nach einem Soll-drehzahlssprung benötigt, um 90 % des Sprungvorgabewerts zu erlangen).

Dem stehen Drehzahlrestriktionen entgegen, wie die zulässige Bauteilspannung, die sich vor allem aus der Temperaturbelastung der Verdichterstufe sowie den verfügbaren Rad- und Rotorwerkstoffen, insbesondere den Werkstoffen zur Fixierung der Rotormagneten, ergibt. Weiterhin drehzahlbegrenzend wirken sich die zulässigen Umlaufgeschwindigkeiten der zur Rotoraufnahme eingesetzten Wälzlager aus. Diese werden anstelle der bei ATL üblichen Gleitlager verwendet, damit die Ölversorgung entfallen kann.

Die verfügbaren Wellenwerkstoffe, die Abstände von Lagermitte zur Schwerpunktlage des Verdichterrads auf dem auskragenden offenen Wellenende sowie

			12 V	48 V
Aero- dynamik	Ref. Punkt (π , $\dot{m}$)	– ; kg/h	1,25; 150	1,45; 300
	Beschleunigungszeit T_{90}	ms	<350	<250
	Nennndrehzahl eAC (max.)	1/min	70k	65k
Elektronik	Spannungslage	V	12	48
	Stromaufnahme stationär	A	150	105
	Max. Strom dynamisch <1s	A	200	150
	Max. zulässige el. Leistung	kW	2,4	7,2
	Dauerhafte el. Leistung	kW	1,8	5,0
Mechanik	Kum. Laufzeit/Lebenszeit	h	> 1500/6000	
	Zul. Beschleunigungsläufe	–	> 1,5 Mio.	
	Zul. Aktuierungsfrequenz AF (Aktivzeit/Passivzeit)	%	100	
	Zul. abs. Druck/Temp. Saugrohr	bar/°C	3,5-4/190	

BILD 3 Spezifikation des elektrischen Verdichters (eAC)

die Steifigkeiten von Lagern und vom Gehäuse definieren die Lage der Eigenfrequenzen des Rotors. Sie wiederum limitiert die Nennndrehzahl, die zwingend unterkritisch auszulegen ist. Als bester Kompromiss wurde eine Nennndrehzahl zwischen 65.000 und 70.000/min für den eAC gewählt.

KONSTRUKTION UND SPEZIFIKATION

Die aufgrund solcher Drehzahlen nicht selbstdichtend herstellbaren Kugellager, mit Käfigen aus PEEK und einem Hochleistungsschmierstoff, werden in einer vorgespannten Fest-/Loslager-Kombination und Spezialaufnahmen des Außenrings zum Toleranzausgleich und zur Verdrehssicherung eingesetzt.

Aus dem Angebot an Werkstoffen zur Herstellung der Verdichterräder scheiden aus Gründen der thermischen und mechanisch-dynamischen Belastung Hochleistungskunststoffe aus. Hinzu kommen herstellungsbedingte Nachteile in der Radgestaltung, die nur begrenzte Wirkungsgrade der Verdichterstufe zulassen.

Daher wurden die Verdichterräder als Aluminiumfrästeil ausgeführt und mit der Optimierung von Nabenlänge und Rückenkontur unter Verwendung modernster, unternehmensinterner CAE-Methoden sowie Verifizierungen an Labor- und Motorprüfständen entwickelt. Massenträgheiten von weniger als 50 % der Nominalwerte kon-

ventioneller Verdichterräder wurden so umgesetzt. Geringe Abstände zur Minderung von Spaltverlusten zwischen Rad und Kontur sowie die gewünschte Druckgussentformbarkeit der gesamten Volute sind weitere Kennzeichen der Verdichtereinheit, **BILD 2**.

Die Gestaltung und Dimensionierung der weiteren Baugruppen erfolgt anhand der Auslegung des gemäß der Momentenbilanz benötigten E-Motors, der sich aus dem bewickelten Stator, dem elektrisch wirksamen Rotorsegment und der Leistungselektronik (LE) zusammensetzt. Letztere nimmt den Leistungsteil mit den Halbleitern, die vom Leistungsteil galvanisch getrennte Steuerplatine mit CAN/LIN-Schnittstelle sowie den Zwischenkreis auf.

Der von der LE angesteuerte, drehzahlgeregelte E-Motor erlaubt sehr unterschiedliche Ausführungsformen. Für den eAC wurde ein bei Pierburg vielfach ein-

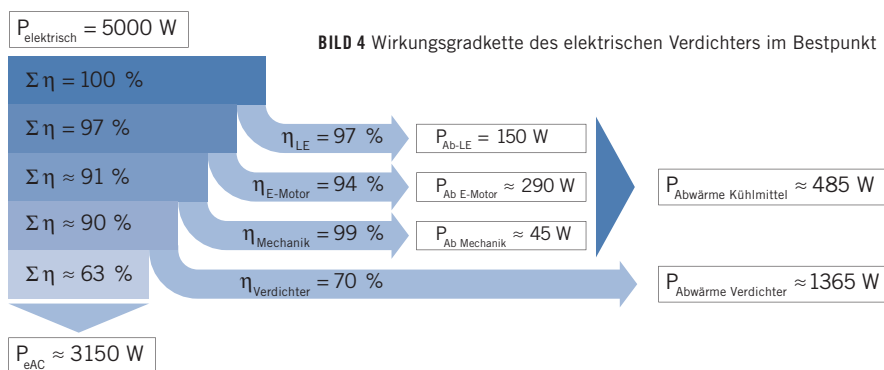
gesetzter permanenterregter und symmetrisch gestalteter Synchronmotor ausgewählt. Die zur Verfügung stehenden begrenzten Bauräume und die daraus abzuleitenden und benötigten hohen Einzelwirkungsgrade waren bei der Wahl maßgeblich. Ebenso existieren Forderungen nach geringen Schallabstrahlungen und einem niedrigen Bauteilpreis. Dieser bedingt vor allem eine klein bauende und effiziente LE sowie einen geringen Bedarf an Zwischenkreiskapazitäten.

Die Motorkonstruktion führt des Weiteren auf der einen Seite durch die mögliche Entfeinerung des Spaltmaßes und der Toleranzen zwischen Rotor und Stator zu einer kostengünstigen Fertigung, auf der anderen Seite zu deutlich geringer ausgeprägten Radialkraftkomponenten mit enormen Vorteilen im NVH-Verhalten.

Der so gestaltete elektrische Verdichter ermöglicht eine gute Skalierbarkeit der Einzelsysteme, um sowohl 12- als auch 48-Varianten mit 2 beziehungsweise 5 kW elektrischer Leistung zu realisieren. **BILD 3** zeigt die gegenwärtigen Spezifikationswerte der in Hardware verfügbaren Applikation.

THERMISCHE BAUTEILBELASTUNG

Trotz hoher Einzelwirkungsgrade treten bei der Umsetzung der elektrischen Leistung thermische Verluste auf, die es zum Schutz des E-Motors und der LE abzuführen gilt. **BILD 4** zeigt exemplarisch die gegebene Wirkungsgradkette bei einer Eingangsleistung von 5 kW, wovon etwa 485 W als Abwärme, primär im E-Motor und der LE, verloren gehen. Ein zwischen E-Motor und E-Gehäuse angelegter umlaufender Kühlmittelkanal mit Durchspülung der Befestigungsebene der Elektronikbaugruppe sorgt für eine direkte Kühlung der zu schützenden Elemente. Temperatursensoren an den



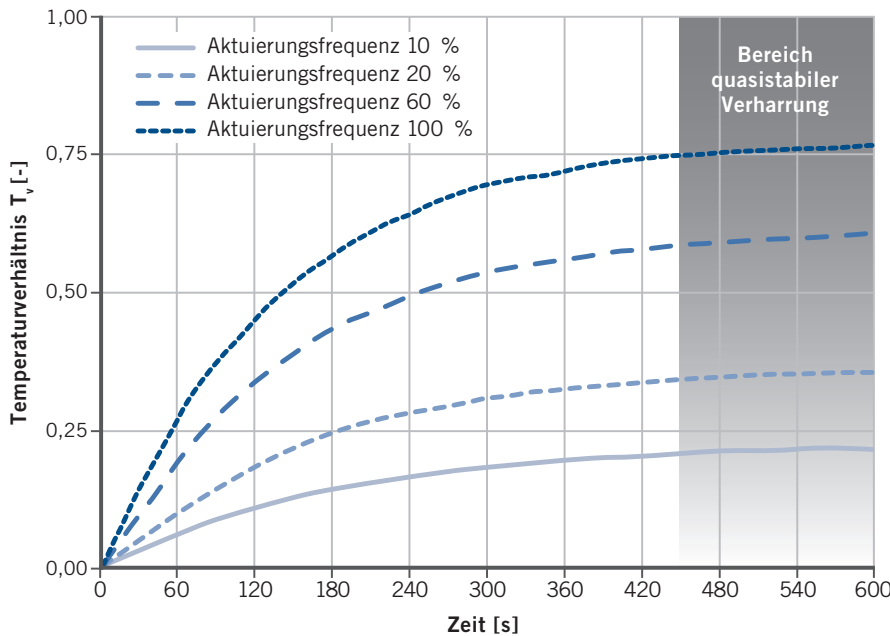


BILD 5 Temperaturverhältnis des E-Motors über Laufzeit und Aktuierungsfrequenz

sichert ein speziell entwickelter Dichtsitz Restleckagen auf Niveau einer Lastregelklappe ab. In einer Ausführungsform wurde die Bypassklappe zudem in den Austritt der Volute integriert und ein sehr kompaktes Gesamtgehäuse geschaffen, was vorteilhaft für die Kosten und den Bauraumbedarf ist.

FAZIT UND AUSBLICK

Der vorgestellte elektrische Verdichter erfüllt aufgrund seines modularen Aufbaus und der Verfügbarkeit als 12- und 48-V-Komponente die Anforderungen sowohl für den diesel- als auch ottomotorischen Einsatz. Innovative Lösungen zur Steigerung der Zuverlässigkeit, der Dauerhaltbarkeit und zur Ermöglichung langer Einschaltzeiten wurden integriert. Der eAC ist für den Einsatz in Kombinationen mit einem konventionellen Turbolader zur Verbesserung des Transientenverhaltens ausgelegt. Wird die gesamte Aufladestrecke gezielt auf den eAC abgestimmt, lassen sich die größten Verbesserungen in allen Zielparametern darstellen.

LITERATURHINWEISE

- [1] Knirsch, S.; Weiss, U.; Zülch, S.; Kilger, M.: Die elektrische Aufladung im Audi RS5 TDI Concept. In: MTZ 76 (2015), Nr. 1, S. 36-41
 [2] Aymanns, R.; Uhlmann, R.; Nebbia, C.; Plum, T.: Elektrische Aufladung, Neue Freiheitsgrade durch höhere Bordnetzspannung. In: MTZ 75 (2014), Nr. 7-8, S. 12-19
 [3] Forissier, M.; Zechmair, D.; Weber, O.; Criddle, M.; Durrieu, D.; Picon, V.; Menegazzi, P.; Surbled, K.; Wu, Y.: The Electric Supercharger. 34. Wiener Motorensymposium, 2013

Wicklungen und Halbleitern sichern zudem im Rahmen einer Regelungsstrategie die Bauteile vor Beschädigungen.

Die so erzielbare dauerhafte Aktuierungsfrequenz (AF) als Quotient aus Laufzeit mit Nenndrehzahl und Stillstandzeit nimmt Werte von bis zu 100 % an. **BILD 5** zeigt die über der Zeit aufgetragenen Aktuierungsfrequenzen in Abhängigkeit vom Temperaturverhältnis aus Motor, Kühlmittel und zulässiger Grenztemperatur mit der Definition nach Gl. 2:

Gl. 2

$$T_v = \frac{T_{E-Motor} - T_{Kühlmittel}}{T_{zulässig} - T_{Kühlmittel}}$$

Die vom elektrischen Verdichter ermöglichte absolute Einschaltdauer je Lauf ist von verschiedenen Randbedingungen abhängig und kann sich in den Bereich von Minuten erstrecken.

ABDICHTUNG

Da die Verwendung schleifender Dichtungen für den Einsatz zwischen Verdichtergehäuse und Rotor aufgrund der hohen Drehzahlen nicht realisierbar erscheint, besteht die Gefahr, dass Belastungen wie Reagenzien, hohe Lufttemperaturen und Luftdrücke entlang der Rotorwelle in den elektrischen Verdichter gelangen. Alle betroffenen Einzelkomponenten, wie die nicht selbstdichtenden Lager, der E-Motor und die LE, würden durch Erosion, Korrosion und Austrag von Lagerschmiermittel irreversibel geschädigt. Gängige Maßnahmen

wie Labyrinthdichtungen, Wellendichtringe oder Schleuderscheiben erweisen sich als unzureichend. Aus diesem Grund wurde ein Dichtungskonzept entwickelt, das auf bewährte Bauteile in einer neuen Gesamtfunktionalität setzt. Hierdurch ist abgesichert, dass kein belasteter Luft- und Reagenzienaustausch zwischen dem Innenraum des eAC und dem Saugrohr stattfindet. Die Dauerhaltbarkeit des Verdichters ist damit gesichert und gesonderte statische Abdichtungsmaßnahmen, insbesondere der LE, entfallen.

BYPASSIERUNG

Die temporäre Verschaltung des elektrischen Verdichters in die Luftstrecke erfolgt über eine Bypassierungseinrichtung, die möglichst drosselfrei, anschlagsdichtend und flexibel im Betriebsverhalten ist. Bekannte federbelastete, passive Ein/Ein-Wege-Ventile sind diskret öffnend und erzeugen neben Strömungs- auch Öffnungsverluste, was zu erhöhter Gaswechselerarbeit führt. Ebenso sind aktive Betriebspunktverschiebungen zur Verhinderung von Pumperscheinungen durch die Rezirkulation von verdichteter Luft unmöglich.

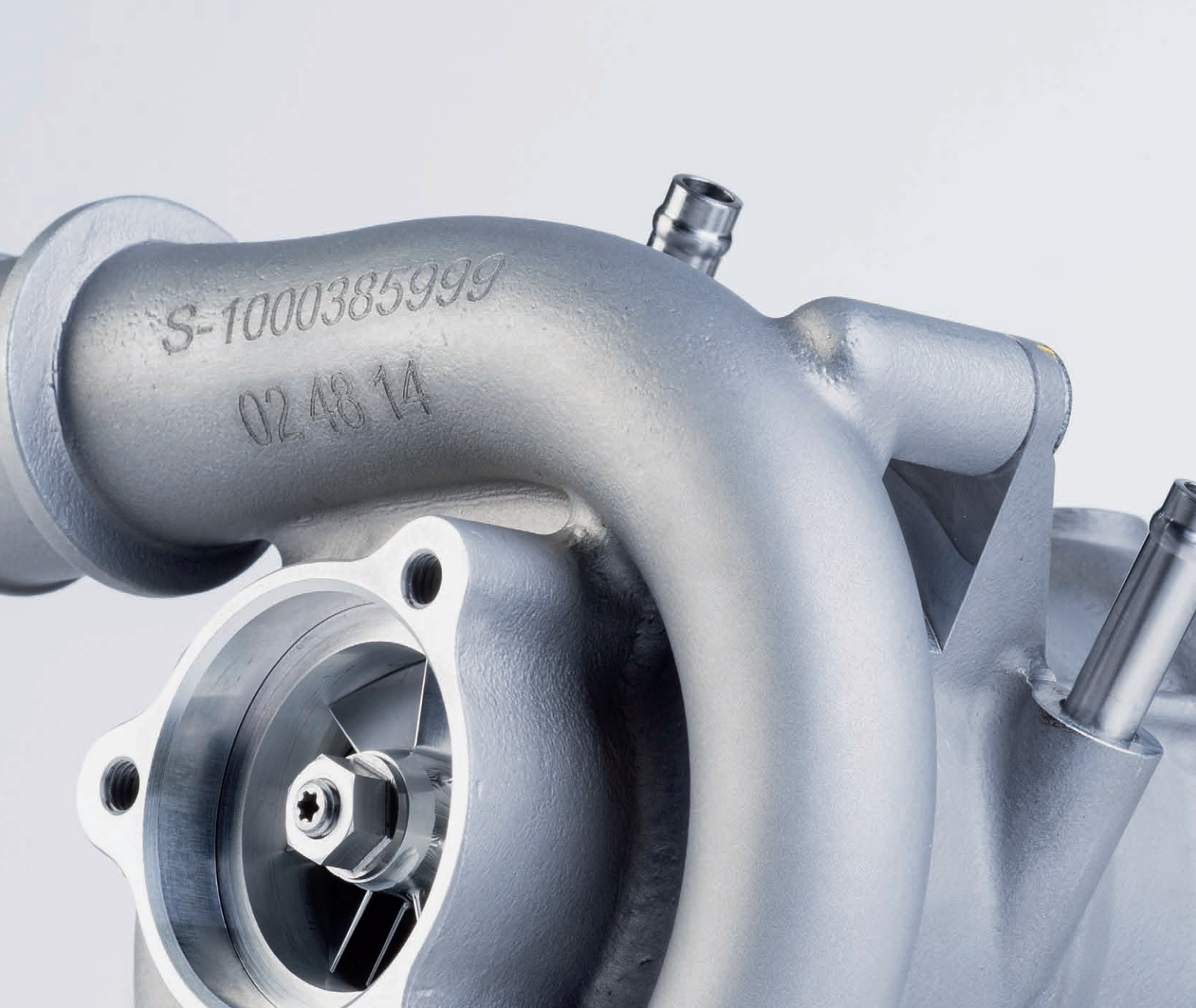
Daher wurde eine elektrische, kontinuierlich und gegenläufig schwenkbare Regelklappe mit Fail-Safe-Funktion entwickelt, die insbesondere das Ziel hoher Systemintegration verfolgt. Die Bypassklappe und weitere Funktionalitäten können so in einer Einheit zusammengefasst werden. Zudem



DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.springerprofessional.de/MTZ



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
 order your test issue now:
springervieweg-service@springer.com



The Electric Supercharger Challenge, Conception and Implementation

Electric superchargers enable improvement in CO₂ and pollutant emissions while simultaneously enhancing the driveability and subjective driving experience. Based on the technical challenges, the Pierburg GmbH introduces the in house developed electrical air charger.

AUTHORS



Dipl.-Ing. Stefan Rothgang
is Senior Manager for
Auxiliaries & Alternative Drives
in the Advanced Engineering
of the Pierburg GmbH
in Neuss (Germany).



Dipl.-Ing. Michael Pachmann
is Head of the Emission Controls
Business Unit at the Pierburg GmbH
in Neuss (Germany).



Dipl.-Ing. Sven Nigrin
is Electronic Development Engineer
for Auxiliaries & Alternative Drives
in the Advanced Engineering of the
Pierburg GmbH in Neuss (Germany).



Markus von Scheven, M. Sc.
is E-Engine Development Engineer
for Auxiliaries & Alternative Drives
in the Advanced Engineering of the
Pierburg GmbH in Neuss (Germany).

ELECTRICALLY SUPPORTED
ENGINE SUPERCHARGING

In addition to perceivable features like acceleration and power characteristics, end customers especially cite low fuel consumption as a criterion when buying a new vehicle. This and further reduced CO₂ emission limits from 130 to 95 g/km represent the central challenges for the manufacturers in developing vehicles and their powertrains.

While these overall development goals had long been considered almost irreconcilable with one another, the paradigm shift from singular powertrain combustion engines to a partially electrified powertrain offers entirely new design possibilities.

Vehicle electrical systems with suitably adjusted voltage and ampacity thus enable the use of high-performance mechatronic components that can be operated flexibly and independently from the operational status of the combustion engine. Downsizing and downspeeding concepts employ this flexibilisation within the context of a partial electrification of the supercharging process, in which a purely electrical supercharger is added to supplement the conventional supercharging unit. The result is a considerably accelerated build-up of supercharging pressure from low revolution speeds. The high torque thereby made available enables one to experience performance previously known only from purely electric powertrains [1, 2, 3].

As an established supplier of 12-, 48-V and high-voltage components, Pierburg GmbH has added a supercharging so-called "electric Air Charger" (eAC) to its product portfolio in order to take advantage of the evident market potential. The challenges encountered in developing the eAC – as well as the problem-solving approaches and differentiating features – shall be described in greater detail in the following.

POSITIONING THE ELECTRIC
SUPERCHARGER IN THE AIRFLOW

The eAC can be freely positioned anywhere within the airflow stream, the setup is solely based on the technical requirements. Comparably short, temporary usages for rapid availability of supercharging pressures characterise the scope of application for the component,

thereby making it an ideal part of a multistage supercharging system. The intermittent mode of operation of the eAC makes it sensible to use a parallel arranged bypass installation, which either connects to the eAC in series with the exhaust-driven supercharger or guides the air directly to the engine without passing through the eAC.

Presenting a simplified airflow intake path, **FIGURE 1** indicates possible mounting positions for the eAC, which are evaluated in a matrix. Each mounting position presents both beneficial and disadvantageous, partially contrary effects in the interaction between component and combustion engine. In addition to the improved response time, similar to

that of a naturally aspirated engine, and reduced pre-catalyst exhaust gas emissions through adjusted engine air conditions, increased exhaust gas recirculation rates are obtainable depending on the position. Moreover, the overall efficiency of the electric supercharger in positions 3 and 4 can be positively influenced due to the fact that the compressor maps of the eAC can be narrower resulting in higher efficiency. Furthermore, high air pressures and air temperatures that might place stress on the components must be taken into consideration early in the design phase of the eAC. The depositions of the oil bearing system of an upstream supercharging unit and blow-by gases with elements of

engine oil, fuel and water vapour likewise exert critical effects on components. The same applies for discharges from the low-pressure EGR section, with sediments from GPF/DPF systems as well as corrosive reagents.

TARGET DESIGN PARAMETERS

The highest possible utility value of an electric supercharger is measured based on the following target requirements:

- high acceleration/rotational speed gradients
- high aerodynamic capacities/high overall efficiency
- smallest possible outer dimensions
- low component costs.

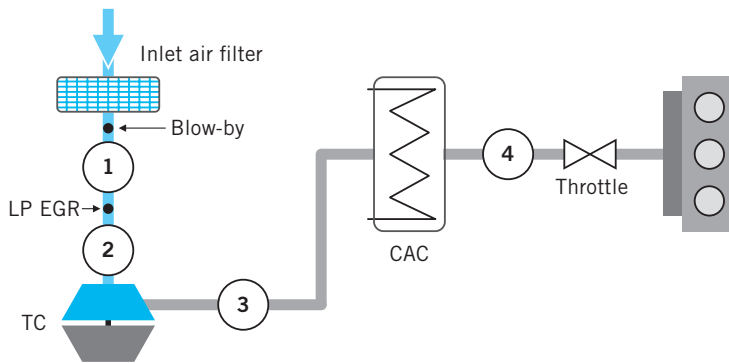
In addition, one must ensure functionality over the course of the entire engine service life.

In accordance with Eq. 1, the eAC converts electrical energy into drive shaft torque, which translates into acceleration and flow capacity in transient phases:

Eq. 1	$M_{E-motor} = M_{Flow} + M_{Acceleration}$ with $M_{Acceleration} = J \cdot \dot{\omega}$
--------------	---

The mass inertia of the rotating system, consisting of the rotor unit and compressor wheel, proves to be the main factor for achieving high rotor accelerations. Here the compressor wheel shows the greatest potential for reducing mass inertia, so that its constructive design and dimensioning must take that into account. Tests confirm that designing the wheel for high nominal rotational speeds helps to achieve lower T_{90} acceleration times. T_{90} is defined as period the eAC needs after a certain speed step to reach 90 % of the new setpoint.

This runs up against rotational speed restrictions, like the permissible component stress, which especially results from the temperature load on the compressor wheel as well as the available wheel and rotor materials, particularly the materials for fixing the rotor magnets. Also limiting rotational speeds are the permissible velocities of the roller bearings used for mounting the rotor which, instead of the plain bearings normally used in exhaust-driven superchargers, are employed to eliminate the need for an oil supply.



Characteristic	Position			
	4	3	2	1
Transient behaviour of combustion engine	++	+	0	0
Average compressor efficiency	++	+	-	0
Enabler for emission reduction	++	+	0	-
Risk of fouling / corrosion / formation of lacquer	0	-	+	++
Thermomechanical stress	0	-	+	++

FIGURE 1 Possible positions of the electric supercharger in the airflow path

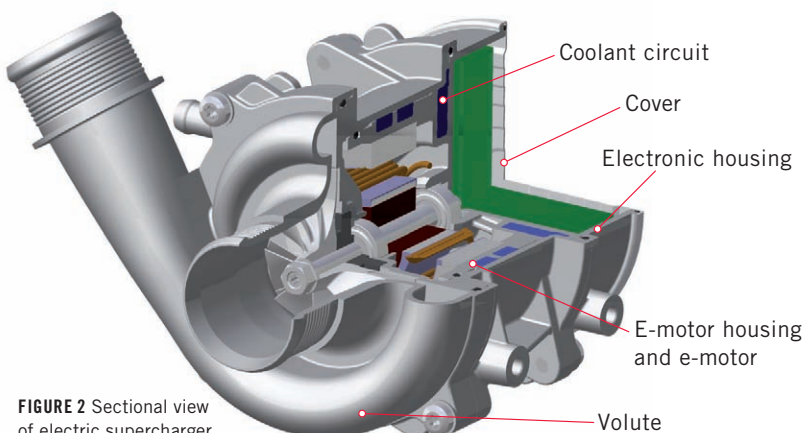
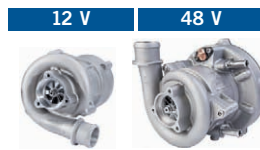


FIGURE 2 Sectional view of electric supercharger



Aero-dynamics	Operating point (π , $\dot{m}$)	– ; kg/h	1.25; 150	1.45; 300
	Acceleration T_{90}	ms	<350	<250
	Rated speed eAC (max.)	rpm	70k	65k
Electronics	Voltage level	V	12	48
	Current steady-state	A	150	105
	Max. current transient <1 s	A	200	150
	Max. el. power supply	kW	2.4	7.2
	El. power supply steady-state	kW	1.8	5.0
Mechanics	Accumulated run time / lifetime	h	>1500/6000	
	Max. speed-up no.	–	>1.5 Mio.	
	Max. actuating frequency	%	100	
	Max. air pressure / temperature intake manifold	bar/°C	3.5-4/190	

FIGURE 3 Electric supercharger specification

The available drive shaft materials, the distances from the centre of the bearing to the centre of gravity of the compressor wheel as well as the bearing and housing stiffnesses define the resonance frequency profile of the rotor. This limits the rotational speed of the rotor which has to stay subcritical. A nominal rotational speed of between 65,000 and 70,000 rpm was selected as the best compromise for the eAC.

CONSTRUCTION AND SPECIFICATION

The ball bearings (with retainers made of PEEK and a high-performance lubricant), which cannot be manufactured as self-sealing due to the high rotational speeds, are inserted in a pre-stressed fixed/movable bearing combination and special holding fixtures of the outer ring for tolerance compensation and rotation prevention.

Among the range of materials for manufacturing compression wheels, high-performance plastic materials are

excluded due to the expected thermal and dynamic mechanical stress. Added to that is a limited degree of freedom in the design of a wheel made from plastic material resulting from manufacturing limitations, which in turn limits the efficiency for the supercharger stage.

For this reason, the compressor wheels were designed as a milled aluminium component and developed with an optimised hub length and rear contour by employing the most modern, internal CAE methods as well as verifications on laboratory and engine test benches. Mass inertias of less than 50 % of the nominal values of conventional compression wheels were achieved in this way. Small clearances to reduce gap losses between wheel and contour as well as the desired high-pressure die casting demoldability of the entire volute are additional features of the supercharger unit, **FIGURE 2**.

The design and dimensioning of the other eAC components is based on the design of the electric motor. The electric motor itself consists of the wound stator, the electrically active rotor segment and

the power electronics (PE). The latter includes the power element with the semiconductors, the control board (galvanically separated from the power element with CAN/LIN interface) and the intermediate circuit.

The electric motor, controlled and rpm-regulated by the PE, can be designed in different ways. A permanently excited and symmetrically designed synchronous motor, used within the company on numerous occasions, was selected for the eAC. The limited available space – and thus the high motor efficiency required – were decisive in the selection process. Additional requirements are low noise radiation and a low price for components. Above all, this demands an efficient and small-sized PE as well as a low need for intermediate circuit capacities.

Furthermore, the motor design leads on the one hand to cost-effective fabrication due to the possible simplification of the clearances and tolerances between rotor and stator, while on the other hand leading to significantly less pronounced radial force components with enormous advantages in the NVH.

The eAC design constructed in this way enables good scalability of individual systems in order to realise both 12- and 48-V models with 2 and/or 5 kW electric power ratings. **FIGURE 3** shows the current specification figures of the application available in hardware.

THERMAL COMPONENT STRESS

Despite high efficiency factors of the individual components, the electric power conversion induces thermal losses, which need to be taken care of to protect the electric motor and the PE. As an example, **FIGURE 4** shows the given efficiency chain with a power input of 5 kW, of which about 485 W becomes lost as waste heat,

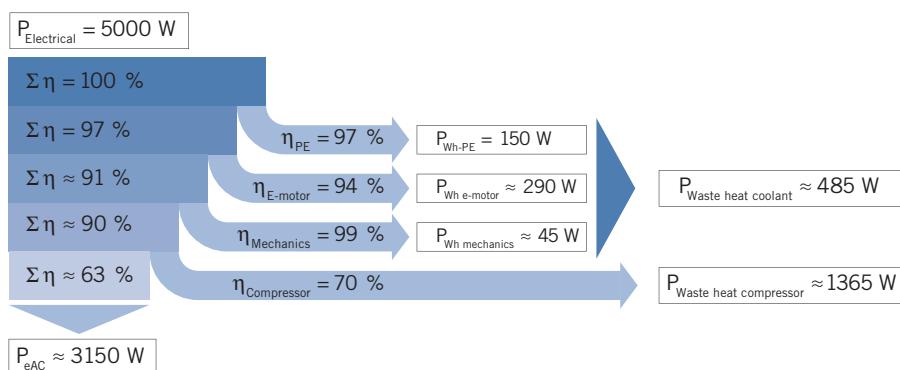


FIGURE 4 Efficiency chain of electric supercharger at optimum operating point

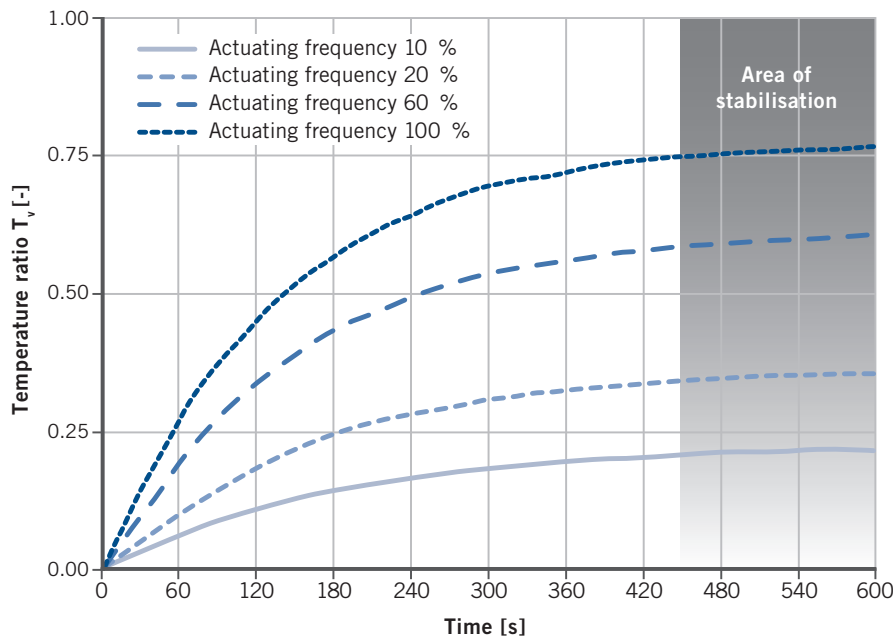


FIGURE 5 Temperature ratio of the electric motor over runtime and actuation frequency

primarily in the electric motor and the PE. A circulating coolant duct placed between the electric motor and its housing ensures direct cooling of the elements needing protection. Temperature sensors on the coils and semiconductors enable a control strategy to additionally protect the elements against damage.

The thereby achievable actuating frequency (AF) as a quotient of runtime over nominal rotation speed and idling time can assume values of up to 100 %.

FIGURE 5 shows the actuating frequencies plotted over time relative to the temperature ratio of the engine, coolant and permissible temperature limit with the definition according to Eq. 2:

Eq. 2	$T_v = \frac{T_{Emotor} - T_{Coolant}}{T_{Limit} - T_{Coolant}}$
-------	--

The absolute switch-on time per cycle made possible by the eAC is dependent upon various constraints and can extend into minutes.

SEALING

The apparent impracticality of using abrasive seals for insertion between the eAC housing and rotor due to the high rotational speeds exposes the risk that stresses like reagents, high air temperatures and air pressures will find their way along the rotor shaft into the electric supercharger. All individual components

affected, such as the non-self-sealing bearings, the electric motor and the PE, would be irreversibly damaged by erosion, corrosion and bearing lubricant discharge. Common countermeasures such as labyrinth seals, shaft seal rings or centrifugal discs prove inadequate. A sealing concept was therefore developed, which relies on proven components in a new overall functionality. This ensures that no air and reagent contamination exchange occurs between the interior of the eAC and the intake manifold. The durability of the eAC is thereby ensured and separate static sealing measures, especially of the PE, can be eliminated.

BYPASSING

The temporary interconnection of the eAC in the airflow stream takes place via a bypass device, which is as throttle-free, compression-sealed and flexible as possible in its operating behaviour. Common spring-loaded, passive one-way valves are discretely opened and generate flow losses, which lead to increased losses in gas exchange. Strategies for preventing pump phenomena (through the recirculation of compressed air) are also impossible.

Therefore an electric, continuous and counterrotatingly pivotable control butterfly valve with fail-safe function was developed, which was especially dedicated to the aim of high system integration. In this way, the bypass valve and other functionalities can be combined into one unit.

Moreover, a specially developed seal seat protects against residual leakage at a level comparable with a heavy-duty butterfly valve. In one design variation the bypass valve was additionally integrated into the outlet of the volute, creating a very compact overall housing, which is advantageous in meeting most ambitious cost and package targets.

CONCLUSION AND OUTLOOK

Due to its modular structure and availability in 12-V and 48-V component versions, the presented electric supercharger fulfils the operating requirements for both diesel and gasoline engines. Integrated into the design were innovative solutions for increasing reliability and durability as well as enabling the possibility of long operating times. The eAC is designed for usage in combination with a conventional turbocharger for improving transient response. Tuning the entire air system specifically to the eAC yields the greatest improvements in all target parameters.

REFERENCES

- [1] Knirsch, S.; Weiss, U.; Zülch, S.; Kilger, M: Electric Supercharging in the Audi RS 5 TDI Concept. In: MTZ worldwide 76 (2015), No. 1, pp. 14-19
- [2] Aymanns, R.; Uhlmann, R.; Nebbia, C.; Plum, T.: Electric Supercharging, New Opportunities with Higher System Voltage. In: MTZ worldwide 75 (2014), No. 7-8, pp. 4-11
- [3] Forissier, M.; Zechmair, D.; Weber, O.; Criddle, M.; Durrieu, D.; Picron, V.; Menegazzi, P.; Surbled, K.; Wu, Y.: The Electric Supercharger. 34th Vienna Motor Symposium, 2013

