

# MODULARE ABGASNACHBEHANDLUNG

Immer stringenteren Anforderungen an die Abgasemissionen, wie die Richtlinie EG 97/68 Stufe IV beziehungsweise USA EPA CARB Tier 4 sowie weitere gesetzliche Regelungen, stellen besonders für Großmotoren vor dem Hintergrund flexibler Einsatzgebiete große Herausforderungen dar. Flexible, modulare Abgasnachbehandlungssystembaukästen mit aus den Bereichen Onhighway und Pkw übernommenen Technologieansätzen und deren Anpassungen an die Besonderheiten der Offhighway-Branche stehen daher im Vordergrund für das von Boysen entwickelte Konzept der modularen Abgasnachbehandlung.

## AUTOREN



### DR. JÜRGEN SCHMIDT

ist Bereichsleiter Entwicklung der Friedrich Boysen GmbH & Co. KG in Altensteig.



### MATHIAS KECK

ist Technischer Leiter der BIN Boysen Innovationszentrum Nagold GmbH & Co. KG in Nagold.



### FRANK BÜHLER

ist Teamleiter Konstruktion für die Bereiche Nutzfahrzeug und Offhighway der BIN Boysen Innovationszentrum Nagold GmbH & Co. KG in Nagold.



### BJÖRN WINDHAUSEN

ist Projektleiter für die Bereiche Nutzfahrzeug und Offhighway der BIN Boysen Innovationszentrum Nagold GmbH & Co. KG in Nagold.

## MOTIVATION

Die Forderung nach Modularität für Offhighway-Anwendungen ergibt sich spätestens, wenn die 1:1-Übernahme eines Nutzfahrzeugmotors inklusive seiner vollintegrierten One-Box-Abgasanlage am nicht vorhandenen Bauraum scheitert, ❶ (links). Als Beispiel hierfür sei die Anordnung einer Abgasanlage in einem Ackerschlepper oder in einem Radlader genannt. Die Abgasanlage muss daher in funktionale Einzelmodule unterteilt werden, das heißt, dass die Funktionen getrennt werden und die Vollintegration im kompakten, box-förmigen Bauraum zugunsten der flexiblen Anordnung aufgegeben wird. Die entstehenden Einzelmodule sind flexibel anzuordnen und klaren Funktionen zugeordnet, ❶ (rechts). In ❶ sind die emissionsrelevanten Bausteine aufgeführt, die bereits aus den Bereichen Pkw und Nutzfahrzeug bekannt sind:

- : Oxidationskatalysator (DOC)
- : Dieselpartikelfilter (DPF)
- : SCR-Katalysator (SCR).

Die Zudosierung der für die Stickoxidreduzierung notwendigen wässrigen Harnstofflösung erfolgt über eine standardisierte Boysen-Mischstrecke.

Weitere Kernkomponente der Abgasanlage stellt die Trichterkonstruktion dar, die eine Anbindung in zwei verschiedenen Orientierungen, das heißt axial (180°) und radial (90°), ermöglicht. Für enge Motorräume und andere kompakte Anforderungen bietet sich die radiale Anordnung an. Boysen erwartet, dass rund 85 % aller Einzelstranganlagen radial angeordnet werden. Im Anwendungsbeispiel für einen Acker-

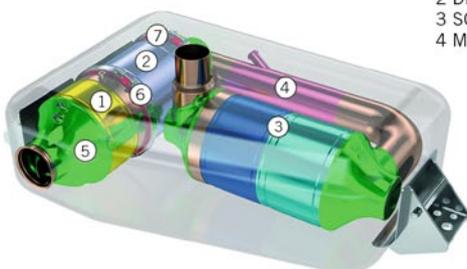
schlepper, ❷, wird ersichtlich, dass die Abgasanlage auch nur teilweise unter der Haube im eigentlichen Motorraum Platz findet. Die SCR-Anlage und das Endrohr – hier stark vereinfacht dargestellt ohne Isolation oder Designbleche – verlaufen senkrecht entlang der Kante der Kabine, das Blickfeld des Fahrers nur minimal einschränkend.

## EINFACHE ANORDNUNG UND MONTAGE

Alle Grundkomponenten können über einfache, abgedichtete Schellenverbindungen angeordnet werden, wie es seit Einführung von Partikelfiltern in Nutzfahrzeugen Standard ist. Alternativ und zugunsten noch höherer Robustheit bietet es sich an, die Anzahl der reversibel zu öffnenden Verbindungen auf die Notwendigen zu beschränken, insbesondere auf den Filter und einzelne Trichterverbindungen, um den Einbau zu erleichtern und Verdrehwinkel sicherzustellen. Die Anordnung der Kernkomponenten gestaltet sich durch die axialen und radialen Trichter sehr einfach, ❸. Bei der Entwicklung der Trichter wurden die Schwerpunkte folgendermaßen gelegt:

- : geringer Druckverlust
- : hohe Strömungsgleichverteilung (UI > 0,95) ohne Strömungsoptimierer
- : Anbindungsmöglichkeit für Sensorik mit Schnittstellen-Platzhalter alle 90° (außer Stutzen)
- : vereinfachtes Werkzeugkonzept durch einen Grundtrichter mit Axial-/Radialstutzen
- : Vereinfachung für den Anwender durch vielfältige Anordnungsmöglichkeiten auf die jeweilige Anwendung.

### One-box system



- 1 DOC
- 2 DPF
- 3 SCR
- 4 Mixing line
- 5 Cone
- 6 Separator
- 7 Clamp/gasket

### Components of the modular exhaust system



❶ One-Box-System (links), Bausteine des modularen Abgassystems  
One-box system (left), components of the modular exhaust system

# MODULAR EXHAUST AFTERTREATMENT

Stricter and stricter requirements for exhaust gas emissions such as the directive EG 97/68 Level IV or USA EPA CARB Tier 4 as well as further regulations present great challenges especially for large engines against a background of flexible areas of application. Flexible, modular exhaust aftertreatment system kits with technology solutions borrowed from on-highway and automotive fields and adapted to the special needs of the off-highway branch are emphasised for the modular exhaust aftertreatment concept developed by Boysen.

## MOTIVATION

The demand for modularity for off-highway applications arises at the latest when the one-to-one takeover of a commercial vehicle engine including its fully integrated one-box exhaust system fails due to lack of installation space, ❶ (left). The arrangement of an exhaust system in a tractor or a wheel loader can be cited here as an example. The exhaust system must therefore be divided into single functional modules, i.e. the functions are separated and the full integration in a compact, box-form installation space is abandoned in favour of the flexible arrangement. The resulting single modules can be arranged flexibly and allocated to clear functions, ❷ (right). The emission-relevant components which are already familiar from the passenger cars and commercial vehicle sectors are listed in ❸:

- : oxidation catalytic converter (DOC)
- : Diesel particle filter (DPF)
- : SCR catalytic converter (SCR).

The watery urea solution necessary for the reduction of nitric oxide is fed in through a standardised Boysen mixing chamber.

Another key component of the exhaust system is the cone construction which enables a connection in two different orientations, that is to say axial (180°) and radial (90°). The radial arrangement is ideal for confined engine spaces and other compact requirements Boysen expects the radial arrangement in around 85 % of all single line systems. The example for an application in a tractor ❹ illustrates that only a part of the exhaust system finds room in the actual engine space under the bonnet. The SCR system and the end pipe – shown here in greatly simplified form without insulation or design plates – run vertically

along the edge of the cab with only minimal obstruction of the driver's field of vision.

## EASY ASSEMBLY AND INSTALLATION

All basic components can be arranged by simple, sealed clamp connections as has been the standard since the introduction of particle filters in commercial vehicles. Alternatively and for the benefit of greater robustness it is advisable to limit the number of reversibly openable connections to the minimum necessary, especially to the filter and individual cone connections in order to simplify the installation and ensure turning angle. The arrangement of the key components is very easy due to the axial and radial cones, ❺. Emphasis was placed on the following properties in the development of the cones:

- : low pressure loss
- : high equal distribution of flow (UI > 0.95) without 'flow optimiser'
- : connection facility for sensors with interface place holder every 90° (except necks)
- : simplified tooling concept by a basic cone with axial/radial necks
- : simplification for the user by flexible arrangement options to the respective application.

The contour of the cone helps to ensure that both the pressure loss and the equal distribution of flow can be kept in an optimum operating range in any combination with a catalyst/filter module. In addition, the system has been optimised in numerous optimisation loops to the extent that flow improvement measures, such as baffle plates or perforated plates, can be dispensed with. The expected pressure losses and even distribution for an application example with a substrate

are shown in ❻. In direct comparison to this, alternative cone versions with and without flow improvements were also evaluated in advance and – due to the much higher pressure loss and therefore higher fuel consumption in operation – were not pursued further. The path lines show that integrated sensors, such as temperature sensors, can monitor the exhaust flow due to the closeness of the flow trajectory to the outer wall, whereas detection of the exhaust flow cannot always be ensured in the alternative, cylindrical cone contours due to distinct dead water areas.

Common monolith dimensions were adopted as decisive factors for the dimensioning of the single modules at beginning of the concept definition. Large ceramic monoliths with diameters 10.5" and 13" – both wall-flow filters and consistent substrates – are available. The two dimensions are ideal for the two

## AUTHORS

### DR. JÜRGEN SCHMIDT

is Head of Development of the Friedrich Boysen GmbH & Co. KG in Altensteig (Germany).

### MATHIAS KECK

is Technical Manager of the BIN Boysen Innovation Centre Nagold GmbH & Co. KG in Nagold (Germany).

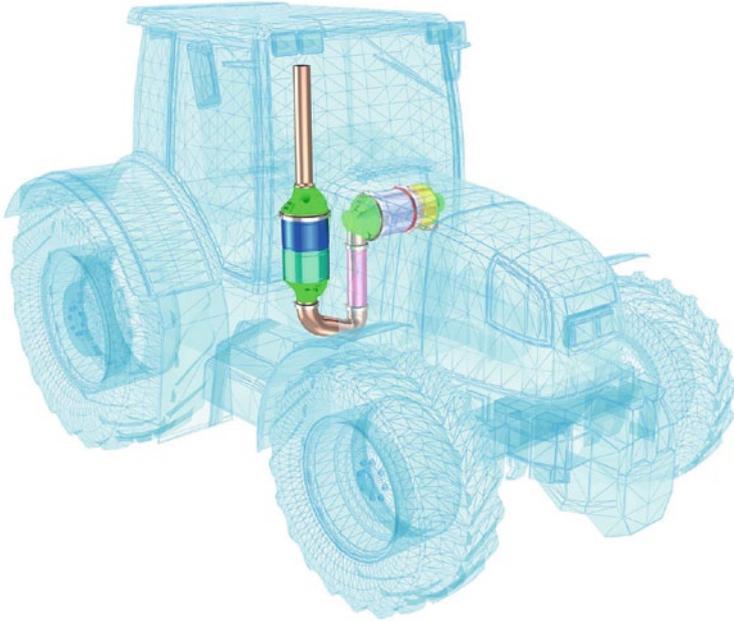
### FRANK BÜHLER

is Design Team Leader for the Commercial Vehicles and Off-Highway Divisions of the BIN Boysen Innovation Centre Nagold GmbH & Co. KG in Nagold (Germany).

### BJÖRN WINDHAUSEN

is Project Manager for the Commercial Vehicles and Off-Highway Divisions of the BIN Boysen Innovation Centre Nagold GmbH & Co. KG in Nagold (Germany).

# Innovative Lösungen



2 Anwendungsbeispiel Ackerschlepper  
Application example field tractor



3 Trichter axial (links) und radial (rechts) in der Schnittdarstellung  
Cone axial (left) and radial (right) in the sectional diagram

Durch die Kontur des Trichters kann sichergestellt werden, dass in jeder Kombination in einem Katalysator-/Filtermodul sowohl Druckverlust als auch Strömungsgleichverteilung in einem optimalen Arbeitsbereich gehalten werden können. Zudem wurde in zahlreichen Optimierungsschleifen das System so weit optimiert, dass auf strömungsverbessernde Maßnahmen, zum Beispiel Prallbleche oder Lochbleche, verzichtet werden kann. In 4 dargestellt sind die zu erwartenden Druckverluste nebst Gleichverteilung für eine beispielhafte Anwendung mit einem Durchflusssubstrat. Im direkten Vergleich dazu wurden im Vorfeld auch alternative Trichterausführungen mit und ohne Strömungsverbesserungen bewertet, aufgrund des deutlich erhöhten Druckverlusts – somit auch höherer Kraftstoffverbrauch im Betrieb – nicht weiter verfolgt. Die Pfadlinien zeigen, dass eingebrachte Sensoren, zum Beispiel Temperaturfühler, durch die Nähe des Strömungsverlaufs zur Außenwandung die Abgasströmung überwachen können, wohingegen bei den alternativen, zylindrischen Trichterkonturen eine Detektierung des Abgasstroms durch stark ausgeprägte Totwassergebiete nicht immer sichergestellt werden kann.

für effiziente  
und kompakte  
Abgasanlagen.

[www.corning.com](http://www.corning.com)

CORNING

smallest power classes in the spectrum, ⑤. The logical consequence of the series are 15" carriers which are not available at the moment, however, in large series on the market. Therefore, the series is continued with two parallel-arranged 12" substrates which results in the development of a suitable distributor as a T-piece which is not dealt with in detail here. The new versions illustrated in the power matrix, ⑥, are based completely on the described components and are adapted to the respective power classes, shifts and adaptations to the specific applications are easy to present. For example, the exhaust system for larger applications especially in the off-highway sector originally designed up to dimension B5 was extended up to the currently biggest version B9 for large engines with a power range up to approximate 2 MW, such as distributed electricity generators or mining vehicles. Large exhaust systems are conceivable but Boysen suggests the use of several single systems for respective exhaust channels of the engine to usefully cover the power range up to 4 MW. Larger versions can be presented in principle by suitable division of the exhaust flow to individual lines of the module exhaust system.

As an example for a large engine of the power class around 1200 kW it should be shown that the selected contour of the 'radial' cone retains the optimum compromise even with the division of the exhaust flow into four parallel-arranged converters, ⑥, both in even distribution and pressure loss and the exhaust system can be scaled as symmetrically as one wishes unless limited by the installation space. The simple contour of the central pipe from which the exhaust flow is evenly distributed to the individual monoliths should be particularly noted in the cross-shaped arrangement of the monoliths shown in section, ⑦. Only the sharp-edged transition to the single pipes (and from there to the familiar cones) was adapted in the contour to avoid interruptions in the flow. Both counter-pressure and inflow could be optimally designed for the engine application for robust, optimum consumption operation at high turnover rates.

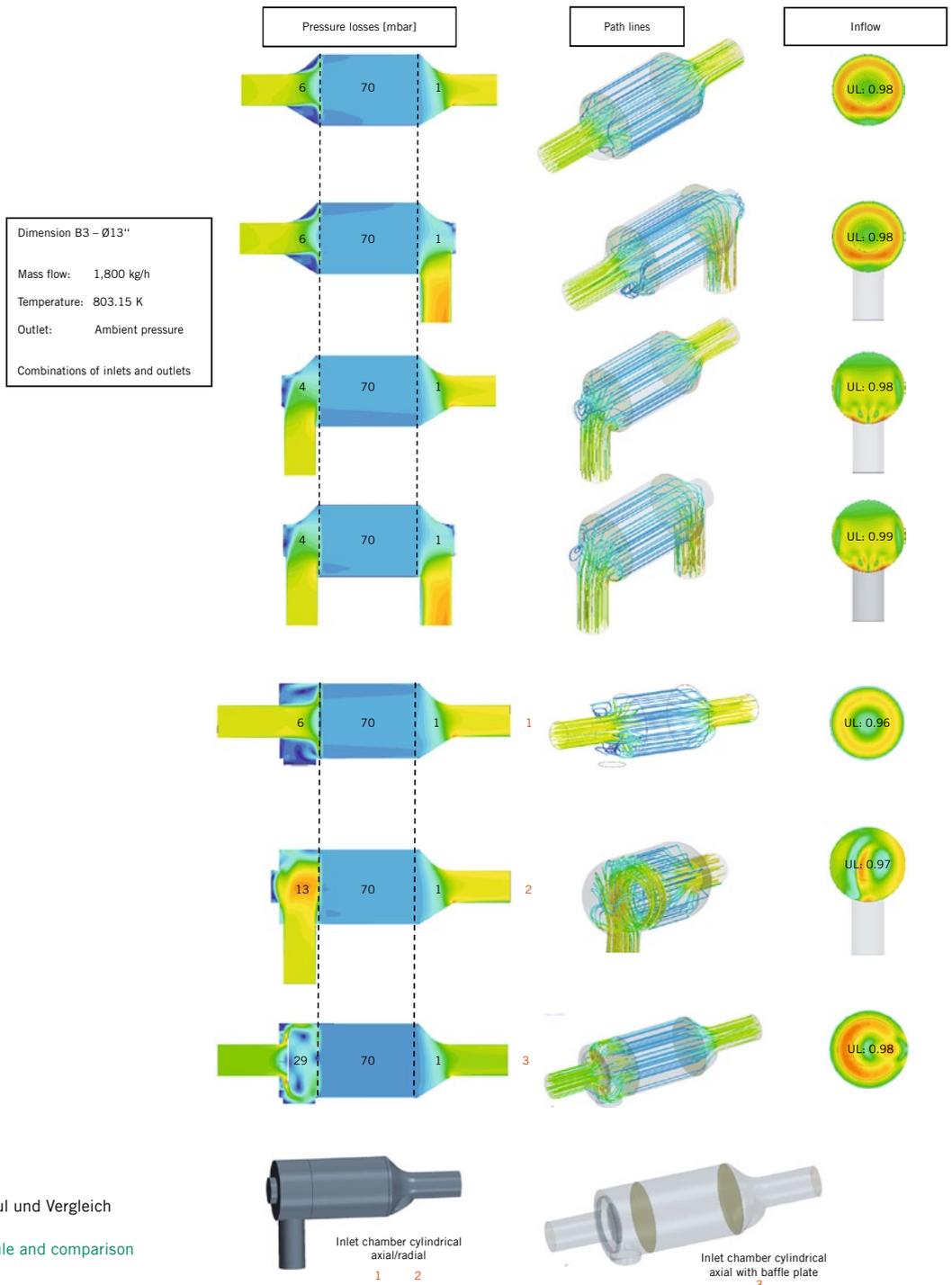
### SUMMARY AND OUTLOOK

The modular kit principle significantly reduces the development and tool costs as well as the associated time spans and therefore, represents a low-cost solution for exhaust aftertreatment system in the

## THANKS

The authors would like to thank their colleagues at Friedrich Boysen GmbH & Co. KG and the Boysen Innovation Centre Nagold GmbH & Co. KG for their support and co-operation in the realisation of this project and its visualisation in the course of this publication.

off-highway sector. In addition, the modular concept offers appropriate potential for future emission requirements and the integration of heat exchangers for utilisation of residual energy in exhaust gas. This can take place by direct conversion of heat by so-called thermal-electric generators (TEG) into electrical energy up to evaporation of fluids and conversion into mechanical energy in expansion machines (Clausius Rankine process). This not only reduces the exhaust emissions of combustion engines by up to 98 %; the energy recovery is an important contribution to the sustainability of mobile and stationary applications of combustion engines.



4 CFD-Bewertung am Einzelmodul und Vergleich zu Alternativkonzepten  
 CFD evaluation on the single module and comparison with alternative concepts

Für die Dimensionierung der Einzelmodule wurde zu Beginn der Konzeptfestlegung auf gängige Monolithendimensionen als maßgebende Faktoren zurückgegriffen. Im Durchmesser 10,5" und 13" große Keramik-Monolithen – sowohl Wall-Flow-Filter als auch durchgängige Substrate – sind verfügbar. Die beiden Dimensionen bieten sich für die beiden kleinsten Leistungsklassen im

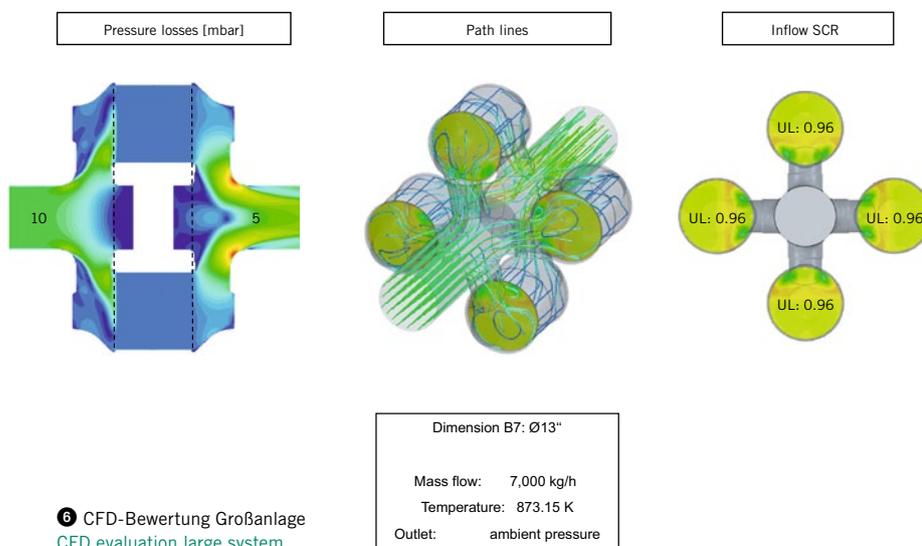
Spektrum an, 5, als logische Fortführung der Reihe ergeben sich 15" große Träger, die jedoch großserientechnisch derzeit am Markt nicht verfügbar sind. Daher wird die Reihe mit zwei parallel angeordneten 12"-Substraten fortgeführt, was die Entwicklung eines geeigneten Verteilers als T-Stück zur Folge hat, der hier nicht weiter vertieft wird. Die in der Leistungsmatrix, 6, dargestellten

neuen Versionen basieren durchweg auf den erläuterten Komponenten und sind abgestimmt auf die jeweiligen Leistungsklassen, Verschiebungen und Anpassungen an die spezifischen Anwendungen sind leicht darstellbar. So wurde die ursprünglich bis Dimension B5 ausgelegte Abgasanlage für größere Anwendungen, insbesondere aus dem Offhighway-Bereich, erweitert bis zur derzeit

| MODULAR EXHAUST SYSTEM | B1        | B2        | B3        | B4        | B5        | B6        | B7        | B8        | B9        |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Power [kW]             | 100–250   | 250–400   | 400–525   | 525–650   | 650–1000  | 1000–1300 | 1100–1400 | 1400–1700 | 1700–2000 |
| Version                | 1-channel | 1-channel | 1-channel | 1-channel | 2-channel | 1-channel | 1-channel | 1-channel | 1-channel |
| Ø pipe [mm]            | 120       | 150       | 140       | 150       | 140       | 150       | 150       | 150       | 150       |
| Ø monolith [°]         | 10.5      | 13        | 2 x 12    | 2 x 13    | 2 x 12    | 3 x 13    | 4 x 13    | 5 x 13    | 6 x 13    |
| Mixing lines           | 1 x       | 1 x       | 1 x       | 1 x       | 2 x       | min. 1 x  | min. 1 x  | min. 1 x  | min. 1 x  |
| Mass flow [kg/h]       | 1300      | 1800      | 2400      | 3100      | 4500      | 5500      | 7500      | 9000      | 11.000    |

## 5 Leistungsmatrix

Power matrix



## 6 CFD-Bewertung Großanlage

CFD evaluation large system

größten Version B9 für Großmotoren mit einem Leistungsbereich bis circa 2 MW, zum Beispiel dezentrale Stromerzeuger oder Mining-Fahrzeuge. Größere Abgasanlagen sind denkbar, jedoch wird von Boysen der Einsatz von mehreren Einzelanlagen für die jeweiligen Abgasfluten des Motors vorgeschlagen, um den Leis-

tungsbereich bis 4 MW sinnvoll abzudecken. Größere Ausführungen sind prinzipiell darstellbar über geeignete Aufteilung der Abgasflut auf einzelne Stränge des modularen Abgassystems.

Beispielhaft für einen Großmotor der Leistungsklasse um 1200 kW soll dargestellt werden, dass die gewählte Kontur des radialen Trichters auch bei Aufteilung einer Abgasflut auf vier parallel angeordnete Katalysatoren, ©, sowohl bei Gleichverteilung als auch beim Druckverlust den optimalen Kompromiss behalten und die Abgasanlage – außer vom Bauraum beschränkt – beliebig symmetrisch aufskaliert werden kann. Bei der im Schnitt, ©, kreuzförmig erscheinenden Anordnung der Monolithen ist die einfache Kontur des Zentralrohrs hervorzuheben, von dem aus der Abgasstrom gleichmäßig auf die Einzelmonolithen aufgeteilt wird. Lediglich der scharfkantige Übergang in die Einzel-

rohre (und von dort in die bekannten Trichter) wurde in der Kontur angepasst, um Strömungsablösungen zu vermeiden. Sowohl Gegendruck und Anströmung konnten für die Motoranwendung optimal ausgestaltet werden für einen robusten, verbrauchsoptimalen Betrieb bei hohen Umsatzraten.

## ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Durch das modulare Baukastenprinzip werden die Entwicklungs- und Werkzeugkosten sowie die dafür vorgesehenen Durchlaufzeiten signifikant reduziert und somit eine wirtschaftliche Lösung für Abgasnachbehandlungssysteme im Offhighway-Bereich sichergestellt. Darüber hinaus bietet das modulare Konzept entsprechendes Potenzial für zukünftige Emissionsanforderungen und die Integration von Wärmeübertragern zur Nutzung der Restenergie im Abgas. Dies kann durch direkte Umwandlung von Wärme durch sogenannte thermoelektrische Generatoren in elektrische Energie bis hin zur Verdampfung vom Fluiden und Umwandlung in mechanische Energie in Expansionsmaschinen (Clausius-Rankine-Prozess) erfolgen. Dadurch werden nicht nur die Abgasemissionen von Verbrennungskraftmaschinen bis zu 98 % reduziert, sondern durch die Energierückgewinnung auch ein wichtiger Beitrag zur Nachhaltigkeit von mobilen und stationären Anwendungen von Verbrennungskraftmaschinen geleistet.

## DANKE

Die Autoren danken den Kollegen der Friedrich Boysen GmbH & Co. KG und der Boysen Innovationszentrum Nagold GmbH & Co. KG für die Unterstützung und Mitwirkung bei der Verwirklichung dieses Projekts und der Visualisierung im Rahmen dieser Veröffentlichung.



DOWNLOAD DES BEITRAGS

[www.springerprofessional.de/ATZoffhighway](http://www.springerprofessional.de/ATZoffhighway)