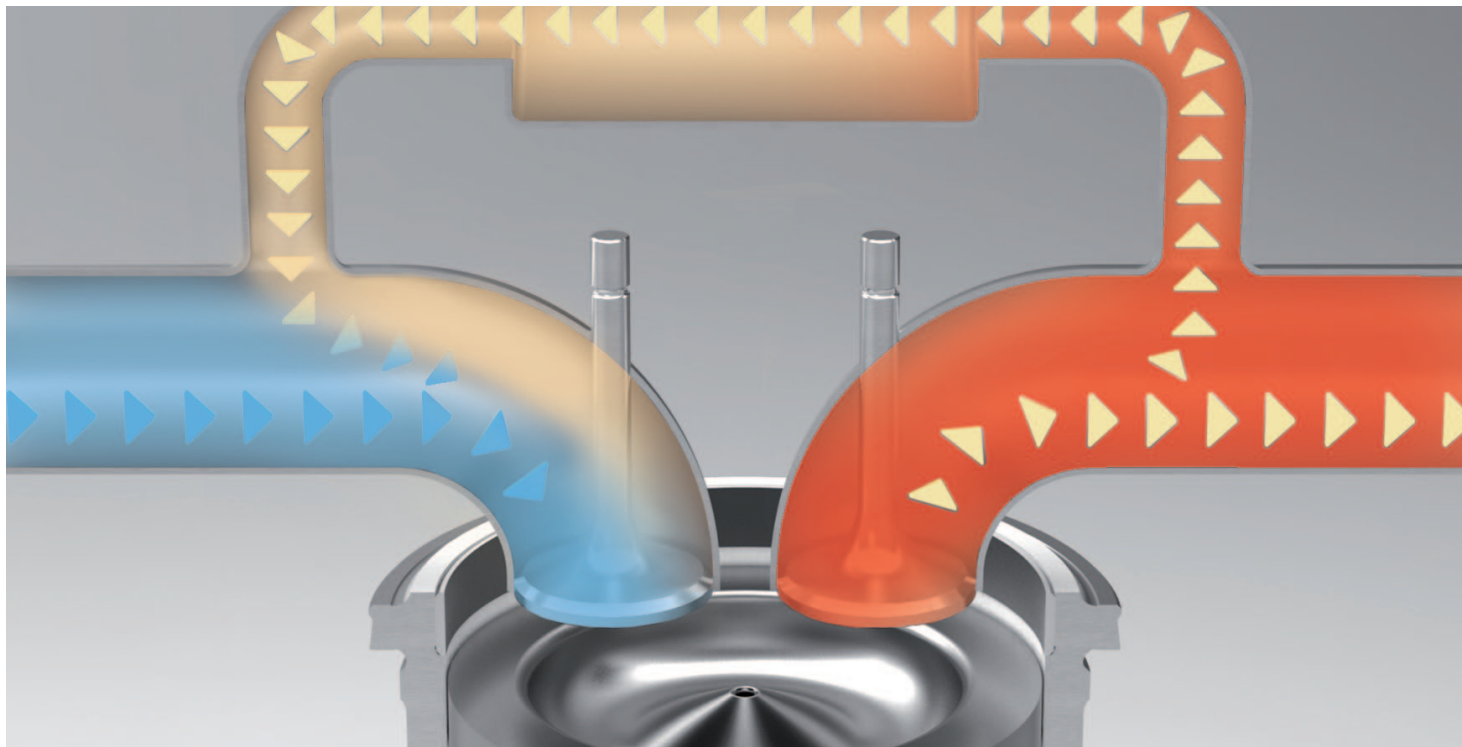


# Abgasrückführung: Innere Motorische Technologie zur Verringerung von Stickoxiden



**Autoren:**

**Dr. Johannes Kech**

Leiter Entwicklung Aufladung und Fluidsysteme

**Günther Schmidt**

Teamleiter Konstruktion Komponenten

**Christian Philipp**

Motorkonzepte, Komponenten, Systeme

**Helmut Rall**

Fachexperte Kühlsysteme

Der Ausstoß von Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) lässt sich innermotorisch verringern, indem ein Teil des Abgases gekühlt und wieder der Ladeluft beigemischt wird. Hierdurch sinkt die Spitzentemperatur der Verbrennung. Die Abgasrückführung (AGR) ist eine der wichtigsten Maßnahmen zur Senkung der Stickoxidemissionen von Dieselmotoren. MTU entwickelt diese wichtige Technologie und die dazugehörigen Funktionen und Komponenten seit Anfang der 90er Jahre. Serienmäßig eingesetzt wurde sie erstmals in der Baureihe 4000 – seit Mitte 2011 bei Öl & Gas-Motoren in Hydro-Frac-Anwendungen für die Emissionsstufe EPA Tier 4 interim sowie bei Bahnmotoren für die Emissionsstufe EU IIIB, die 2012 in Kraft trat.

**Wege zur Verringerung von Stickoxidemissionen**

MTU hat den Anspruch, mit seinen Motoren den Ausstoß von Rußpartikeln und Stickoxiden zu senken und damit den weltweit immer strengeren Emissionsrichtlinien gerecht zu werden. Der von MTU primär verfolgte Weg ist eine schadstoffärmere Verbrennung, also eine innermotorische

Lösung. Dabei muss allerdings eine prinzipielle Abhängigkeit berücksichtigt werden: Verbrennt der Kraftstoff mit hoher Temperatur im Zylinder, entstehen zwar wenig Rußpartikel, aber viele Stickoxide. Bei niedriger Verbrennungstemperatur sind die Stickoxidemissionen gering, aber es bilden sich mehr Rußpartikel. Für das richtige Gleichgewicht müssen alle Schlüsseltechnologien,

die die Verbrennung beeinflussen, optimal aufeinander abgestimmt werden. Insbesondere im Zusammenspiel mit der Einspritzung und Turboaufladung führt die Abgasrückführung zu einer erheblich stickoxidärmeren Verbrennung.

Der zweite Weg zur Reduzierung von Stickoxidemissionen ist die Abgasnachbehandlung mit einem SCR-Katalysator (selective catalytic reduction, kurz: SCR). Sehr niedrige Grenzwerte sowohl für Stickoxide als auch für Dieselpartikel können ein solches SCR-System erforderlich machen.

Mit Abgasrückführung lassen sich die Stickoxidemissionen um rund 40 Prozent senken. Ein SCR-System entfernt – je nach Anwendung – bis zu 90 Prozent der Stickoxide aus dem Abgas. Bei besonders strengen Emissionsnormen müssen Abgasrückführung und SCR-System kombiniert werden, um die Grenzwerte einzuhalten.

### AGR-Einsatzbeispiele bei MTU-Antrieben

Die seit 2011 gültige US-Emissionsstufe EPA Tier 4 interim fordert für mobile Anwendungen über 560 kW einen maximalen Stickoxidausstoß von 3,5 g/kWh. Dies betrifft bei MTU die Motoren der Baureihen 1600, 2000 und 4000. Bei den Baureihen 2000 und 4000 werden diese Grenzwerte mit der Abgasrückführung erfüllt. Auch die Lokomotoren der Baureihen 1600, 2000 und 4000 für die seit 2012 geltende europäische Emissionsstufe EU IIIB werden mit dieser Technologie ausgestattet. Der Ausstoß von Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen (HC) muss zusammen unter 4,0 g/kWh liegen. Dagegen liegt der Stickoxidgrenzwert für Bahntriebwagen in derselben Emissionsstufe EU IIIB bei nur 2,0 g/kWh. MTU rüstet die Motoren der Baureihe 1600 für den Unterflur-

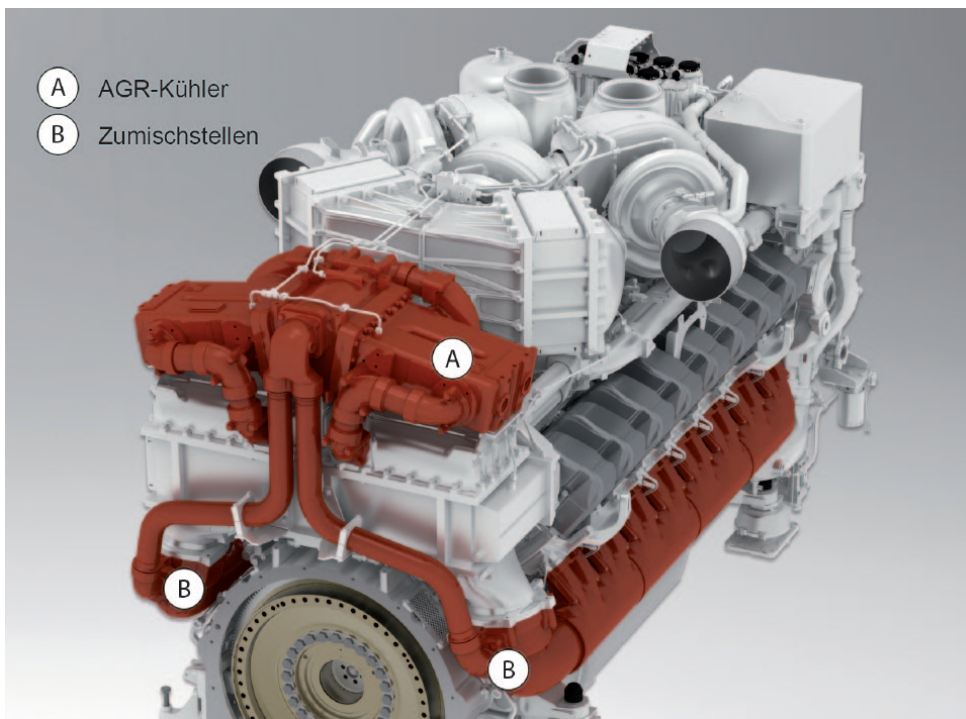


Abb. 1: **Integration der Abgasrückführung in der Motorkonstruktion**  
MTU hat das Abgasrückführungssystem so in die Motorkonstruktion integriert, dass es nur relativ geringe Auswirkungen auf den Bauraum hat.

antrieb hierfür mit einer SCR-Abgasnachbehandlung aus – ohne Abgasrückführung.

Besonders anspruchsvoll ist die 2014 in Kraft getretene US-amerikanische Norm EPA Tier 4 final für mobile Maschinen mit Leistungen unter 560 kW. Hier sinken die Stickoxidgrenzwerte im Vergleich zur Tier-3-Gesetzgebung um 90 Prozent auf 0,4 g/kWh. Um diese strengen Grenz-

werte einzuhalten, setzt MTU sowohl Abgasrückführung als auch ein SCR-System ein. Da mit der Einführung der Emissionsrichtlinie Tier 4 final keine Verschärfung der  $\text{NO}_x$ -Werte vorgesehen ist, wird MTU an der Technologie der Abgasrückführung festhalten. Die MTU hat den Anspruch, durch innermotorische Maßnahmen die verschärften Partikelgrenzwerte einzuhalten. Hierzu erfolgt eine Optimierung und Weiterentwicklung des Einspritzsystems, der Verbrennung und der Turboaufladung.

### Vorteile der Abgasrückführung bei MTU

Generell erfordern Systeme zur Emissionsreduzierung Anpassungen bei den Antrieben. MTU hat alle Bauteile für die Abgasrückführung sehr kompakt in die Motorkonstruktion integriert (Abb. 1), so dass die Änderungen am Motor relativ geringe Auswirkungen auf Bauraum und Abgasstrang haben. Allerdings muss der Fahrzeugkühler auf den erhöhten Kühlleistungsbedarf des Motors angepasst werden. Im Vergleich zu einer Motorapplikation mit einem SCR-System wird dem Kunden damit die Umrüstung seiner Anwendung auf eine neue Emissionsnorm erleichtert, weil die Abgasrückführung zur Stickoxidreduzierung keine zusätzlichen Betriebsstoffe benötigt und so auch keinen Aufwand für einen zusätzlichen Tank und Leitungen verursacht. Der Kunde profitiert von weniger Aufwand bei Handling und Wartung.

### Funktionsweise

Bei der Abgasrückführung wird Abgas vom Abgasstrang abgezweigt, gekühlt und wieder in die Zylinder-

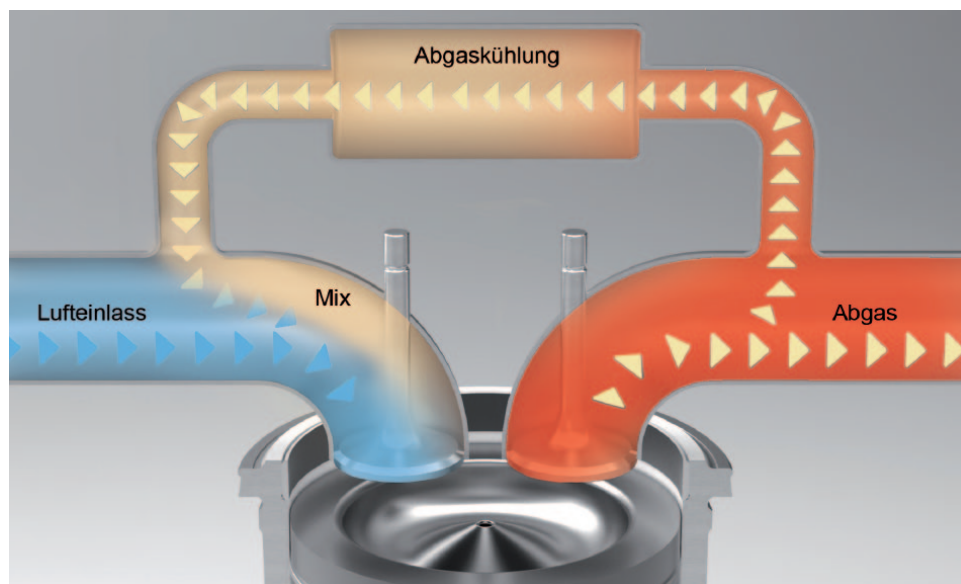


Abb. 2: **Schematische Darstellung der Abgasrückführung**

Bei der Abgasrückführung wird ein Teil des Abgases in den angesaugten Frischluftstrom eingeleitet. Das sich hieraus ergebende Gemisch aus Frischluft und Abgas hat pro Volumeneinheit einen geringeren Brennwert, so dass die Brennraumtemperaturen abgesenkt werden und dadurch weniger Stickoxid ( $\text{NO}_x$ ) entsteht.

## Hochdruck- und Niederdruck-Abgasrückführung

Die heute verbreitete Abgasrückführung entnimmt das Abgas vor der Turbine des Turboladers und führt es auf der Luftseite hinter dem Verdichter zu. Sie arbeitet auf dem Niveau des durch den Turbolader erzeugten Ladedrucks, daher spricht man von einer Hochdruck-Abgasrückführung. Bei der Niederdruck-Abgasrückführung wird das Abgas nach der Turbine des Turboladers entnommen und vor dem Verdichter eingespeist, das Druckniveau entspricht in etwa dem Umgebungsdruck. Im Vergleich zur Hochdruck- hat die Niederdruck-Abgasrückführung gravierende Nachteile: der Verdichter muss mehr Arbeit verrichten, dadurch nimmt die im Ladeluftkühler abzuführende Wärme zu. Zudem benötigt das System einen Dieselußpartikelfilter, ansonsten könnten Partikel im Abgas Komponenten des Rückführungssystems oder des Verdichters und Ladeluftkühlers zerstören. Demgegenüber ist die Hochdruck-Abgasrückführung prinzipbedingt erheblich robuster, so dass kein Partikelfilter benötigt wird. Die Niederdruck-Abgasrückführung könnte ein Mittel sein, um ein bestehendes Motorkonzept nachträglich auf strengere Emissionsnormen umzurüsten. Aufgrund der erheblichen Nachteile des Systems, insbesondere hinsichtlich des Wartungsaufwands für den Kunden, arbeitet MTU derzeit nicht an dieser Variante.

der eingeleitet (Abb. 2). Das Abgas füllt zwar den Brennraum, da es aber sauerstoffarm ist, nimmt es an der Verbrennungsreaktion im Zylinder nicht mehr teil. Die Verbrennung verläuft dadurch insgesamt gedämpft, so dass die Spitztemperatur im Brennraum abgesenkt wird. Das reduziert die Entstehung von Stickoxiden drastisch.

### Patentlösung von MTU: Das Spenderzylinderkonzept

Die Abgasrückführung stellt eine höhere Anforderung an die Abgasturboaufladung, da man höhere Ladedrücke bei reduzierten Massenströmen in der Aufladung realisieren muss. Diese höheren Ladedrücke sind notwendig, um den über die Abgasrückführungsrate erhöhten Massenstrom während des Ladungswechsels in den Zylinder zu fördern.

Zudem kann das Abgas nur dann in den Zylinder des Motors zurückgeführt werden, wenn ein Druckgefälle zwischen Abgas- und Ladeluftseite vorliegt. Dieses Druckgefälle muss über eine geeignete Auslegung der Aufladung hergestellt werden, wodurch der Wirkungsgrad der Aufladung gesenkt wird. Das Druckgefälle zwischen Abgas- und Ladeluftseite hat Ladungswechselverluste zur Folge. Diese Faktoren führen tendenziell zu weniger Motorleistung oder höherem Kraftstoffverbrauch.

Um die gemeinsame Wirkung von Abgasrückführung und Turboaufladung zu verbessern, hat MTU die so genannte Spenderzylinder-Abgasrückführung entwickelt (Abb. 3). Das von MTU patentierte System nimmt nur einen Teil der Zylinder des Motors als Spender zur Abgasrückführung. Eine Abgasklappe (Spenderzylinderklappe) staut den Abgasstrom nach den Spenderzylindern auf und sorgt damit für das notwendige Druckgefälle zwischen Abgas- und Ladeluftseite. Dadurch kann die Aufladung auf sehr gute Wirkungsgrade optimiert werden, von den Ladungswechselverlusten sind nur die Spenderzylinder betroffen.

Im Vergleich zu einer konventionellen Hochdruck-Abgasrückführung (wie bei der Baureihe 1600) sorgt das Spenderzylinder-Konzept (Baureihe 2000 und 4000) für weniger Verbrauch, denn es verringert die motorischen Ladungswechselverluste und erlaubt höhere Turboladerwirkungsgrade. Dafür ist eine zusätzliche Spenderzylinder-Abgasklappe im Vergleich zur Hochdruck-Abgasrückführung erforderlich.

Die Bauteilverschmutzung und damit der Wartungsaufwand über die Lebenszeit der Anwendung sind beim Spenderzylinderkonzept wie

auch bei der Hochdruck-Abgasrückführung geringer: Anders als bei einer Niederdruck-Abgasrückführung werden Luft und Abgas auf der Ansaugseite erst unmittelbar vor den Zylindern zusammengeführt, daher strömt nur saubere Luft und nicht auch partikelhaltiges Abgas durch das Verdichterrad des Turboladers und den Ladeluftkühler.

### Kühlsystem der Abgasrückführung

Das für die Rückführung abgezweigte Abgas hat eine Temperatur von etwa 650 Grad Celsius. Damit ist es viel zu heiß, um direkt in die Zylinder geleitet zu werden; es würde den Brennraum zusätzlich aufheizen, was dem eigentlichen Zweck – die Stickoxidbildung durch niedrigere Verbrennungstemperaturen zu senken – entgegenlaufen würde. Daher wird das Abgas vorher auf rund 120 Grad Celsius abgekühlt (Abb. 4). Das erfordert bei Industriemotoren mit großen Luft- und Abgasmassenströmen hohe Kühlleistungen, die von leistungsstarken Wärmetauschern aufgebracht werden müssen.

Prinzipiell können hierzu Kühler aus dem Nutzfahrzeuggewerbe, wie sie sich in der Großserie bewährt haben, übernommen werden. Um den Kühlbedarf bei einem 16-Zylindermotor mit

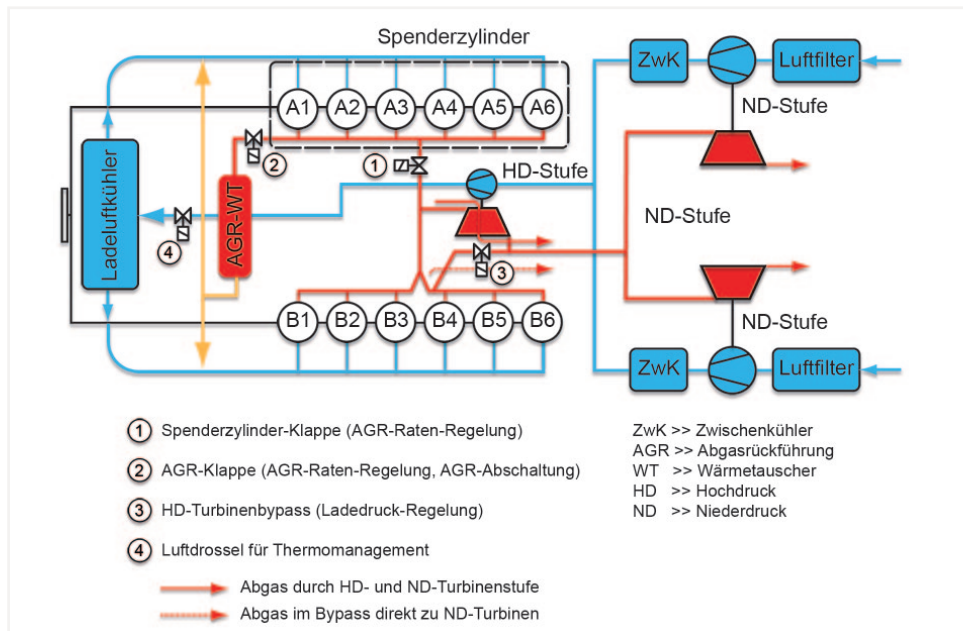


Abb. 3: AGR-Spenderzylinderkonzept

Das von MTU patentierte System sorgt im Vergleich zur konventionellen Hochdruck-Abgasrückführung für weniger Verbrauch, da es die motorischen Ladungswechselverluste verringert und höhere Turboladerwirkungsgrade erlaubt. Hierfür ist eine zusätzliche Spenderzylinder-Abgasklappe notwendig.



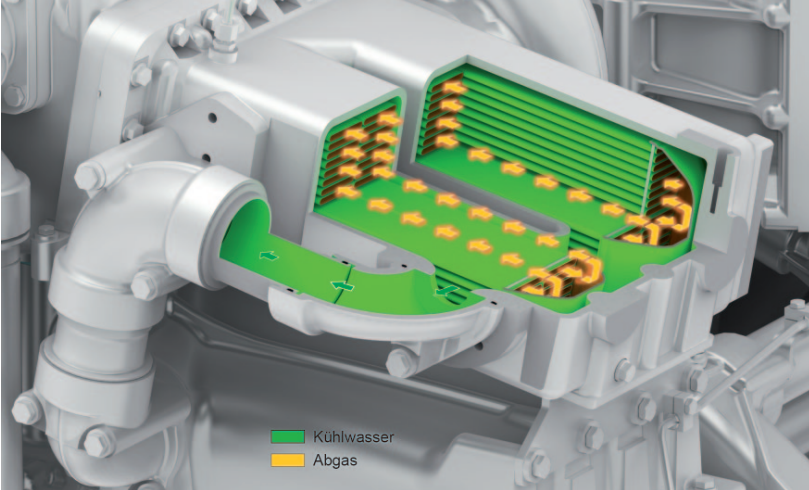


Abb. 4: **Schnitt durch einen Kühler**

Das für die Rückführung abgezeigte Abgas ist mit etwa 650 Grad Celsius viel zu heiß, um direkt in den Zylinder geleitet zu werden. Daher wird es vorher auf rund 120 Grad Celsius abgekühlt. Das Kühlsystem ist optimal in die Motorkonstruktion integriert, so dass der Kunde hierfür nur geringen Bauraumbedarf einkalkulieren muss.

4,8 Litern Zylindervolumen zu decken, wären jedoch vier bis acht handelsübliche Nutzfahrzeug-Kühler in ihrer maximalen Leistungsausführung für die Abgasrückführung notwendig. Die Verwendung einzelner Kühler in dieser Anzahl ist in einer mobilen Anwendung mit der erforderlichen Robustheit nicht möglich. MTU entwickelt daher zusammen mit den Zulieferern integrierte Kühlerlösungen, bei denen nur noch die inneren Komponenten der Wärmeübertrager von bewährten Nutzfahrzeug-Anwendungen übernommen werden und das hochintegrierte Gehäuse aus Guss auf die speziellen Erfordernisse hin selbst entwickelt ist. Das Gehäuse des Wärmetauschers ist optimal an die Kontur des Motors angepasst und nimmt alle Verbindungsleitungen auf. Vorteile für den Kunden: geringer Bauraumbedarf, hohe Funktionssicherheit und geringer Wartungsaufwand. Bei Motoren innerhalb einer Baureihe mit unterschiedlichen Zylinderzahlen nutzt MTU viele Gleichteile. Auch dies führt dank hoher Entwicklungsreife zu großer Funktionssicherheit.

#### Wechselwirkung mit anderen Schlüsseltechnologien

Die Abgasrückführung sorgt zwar für weniger Stickoxidemissionen, ohne Gegenmaßnahmen steigen aber auch die Rußpartikelemissionen in unerwünschtem Maße. Um dem entgegenzuwirken, hat MTU sowohl Einspritzung als auch Aufladung weiterentwickelt. Ob über diese innermotorischen Maßnahmen hinaus ein Dieselpartikelfilter (DPF) zur weiteren Verringerung der Partikelemissionen notwendig ist,

hängt von den Grenzwerten der jeweils für die Anwendung gültigen Emissionsnorm ab.

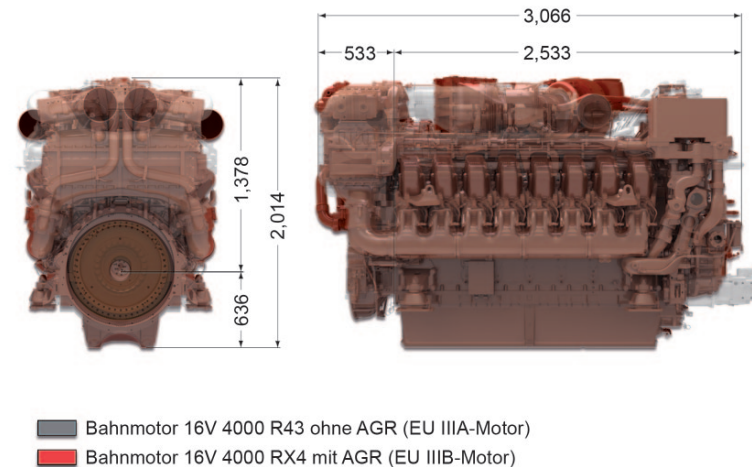
#### Zusammenfassung

Die Abgasrückführung ist eine der Schlüsseltechnologien von MTU zur innermotorischen Emissionsreduzierung. Mit ihrer Hilfe kann die Stickoxidbildung im Zylinder um 40 Prozent und mehr verringert werden, so dass viele Anwendungen – abhängig von den jeweils gültigen Grenzwerten – die Emissionsnormen ohne zusätzliche

Abgasnachbehandlung für Stickoxide erfüllen. Bei besonders strengen Umweltrichtlinien ist ein SCR-System oder sogar eine Kombination aus Abgasrückführung und SCR-System erforderlich. MTU hat die Komponenten der Abgasrückführung kompakt am Motor integriert, so dass kaum zusätzlicher Bauraumbedarf entsteht (Abb. 5). Der Kunde kann seine Anwendung daher ohne großen Aufwand auf neue Emissionsnormen umrüsten. Zudem benötigt das System keine zusätzlichen Betriebsstoffe.

Abb. 5: **Größenvergleich Bahnmotor 16V 4000 R43 ohne AGR und 16V 4000 RX4 mit AGR**

MTU setzte die Abgasrückführung erstmals serienmäßig in der Baureihe 4000 ein – seit Mitte 2011 bei Öl & Gas-Motoren in Hydro-Frac-Anwendungen für die Emissionsstufe EPA 4 Tier interim sowie bei Bahnmotoren für die Emissionsstufe EU IIIB, die 2012 in Kraft trat. Da die einzelnen Komponenten kompakt am Motor integriert sind, entsteht kaum zusätzlicher Bauraumbedarf, was der Vergleich mit den Bahnmotoren der Baureihe 4000 ohne Abgasrückführung zeigt.



- Bahnmotor 16V 4000 R43 ohne AGR (EU IIIA-Motor)
- Bahnmotor 16V 4000 RX4 mit AGR (EU IIIB-Motor)

#### MTU Friedrichshafen GmbH

A Rolls-Royce Power Systems Company

[www.mtu-online.com](http://www.mtu-online.com)

Januar 2014

MTU ist eine Marke der Rolls-Royce Power Systems AG. Schnelllaufende MTU-Motoren und Antriebssysteme sind in Schiffen, Schienenfahrzeugen, Landwirtschafts-, Industrie- und Bergbaufahrzeugen, militärischen Fahrzeugen, in Energiesystemen und in der Öl- und Gasindustrie im Einsatz. Das Portfolio umfasst Dieselmotoren mit einer Leistung bis 10.000 Kilowatt (kW), Gasmotoren bis 2.150 kW und Gasturbinen bis 35.320 kW. Für die Steuerung und Überwachung der Motoren und Antriebsanlagen entwickelt und produziert das Unternehmen maßgeschneiderte Elektroniksysteme.



Power. Passion. Partnership.