Die Abgasanlage des neuen BMW M3

BMW M3 in Heckansicht
Rear end view of BMW M3

Bei BMW steht der Buchstabe M seit 1978 für außergewöhnliche Sportfahrzeuge. Mit dem neuen BMW M3 wird diese Tradition fortgesetzt. Er ist ein absolut alltagstaugliches Sportcoupé und zugleich ein reinrassiger Sportwagen. Entwickelt wurde der M3 von der BMW M GmbH, ein Unternehmen des BMW Konzerns. Herzstück des M3 ist der ebenfalls neue, hoch drehende Reihen-Sechszylinder Saugmotor. Aus 3246 cm^3 schöpft der Motor eine Leistung von 252 kW (343 PS) bei 7900/min. Mit einer spezifischen Leistung von 105,7 PS/l und einem breiten nutzbaren Drehzahlband nimmt dieser Hochdrehzahlmotor eine Spitzenstellung im Saugmotorenbau ein. Die Umsetzung des Hochdrehzahlkonzepts verlangte von den spezifischen Funktionselementen des Motors eine höchst innovative Weiterentwicklung. Die Neukonzeption der Abgasanlage wurde deshalb als besondere Herausforderung angenommen.

1 Einleitung

Die Abgasanlage des neuen BMW M3 entstand unter der Prämisse, dem speziellen Fahrzeugkonzept gerecht zu werden. Die hohe Fahrdynamik des neuen BMW M3 sowie die Hochdrehzahl-Auslegung des Motors stellen hinsichtlich Festigkeit eine große Beanspruchung für die Abgasanlage dar. Der geforderte Leichtbau der Abgasanlage sowie die beengten Einbauverhältnisse im Fahrzeug erschwerten die Auslegung zusätzlich, **Bild 1**.

Es wurde deshalb die Aufgabe gestellt, Zielkonflikte zu entschärfen und technische Lösungen zu entwickeln, die dem Fahrzeugkonzept entsprechen und den Kunden überzeugen. Die Neuentwicklung der M3 Abgasanlage wurde von BMW M geprägt und in Zusammenarbeit mit dem Hersteller ArvinMeritor zur Serienreife gebracht. Das Unternehmen ArvinMeritor entwickelt und fertigt am Standort Finnentrop (NRW-Deutschland) Auspuffsysteme für die Automobilindustrie.

2 Entwicklungsziele

Für die neue Abgasanlage wurden folgende Entwicklungsziele definiert:

- Optimierung der Ladungswechselvorgänge durch die Abgasanlage
- konsequenter Leichtbau (Zielgewicht unter 50 kg)
- Begrenzung der Wärmekapazität im Bereich Krümmer, Vorrohr, und Katalysator
- Erfüllung der Emissionsvorschriften (Abgas, Geräusch)
- eigenständiger, sportlicher Auspuffsound
- dezent sportive Innenraumakustik
- crashoptimierte Auspuffendrohre im BMW M-Look
- dauerhafte BMW-Qualität
- wirtschaftliche Herstellung
- Auspuffkrümmer und Katalysator als Gleichteil verwendbar für den BMW M3, BMW M-Roadster und M-Coupé.

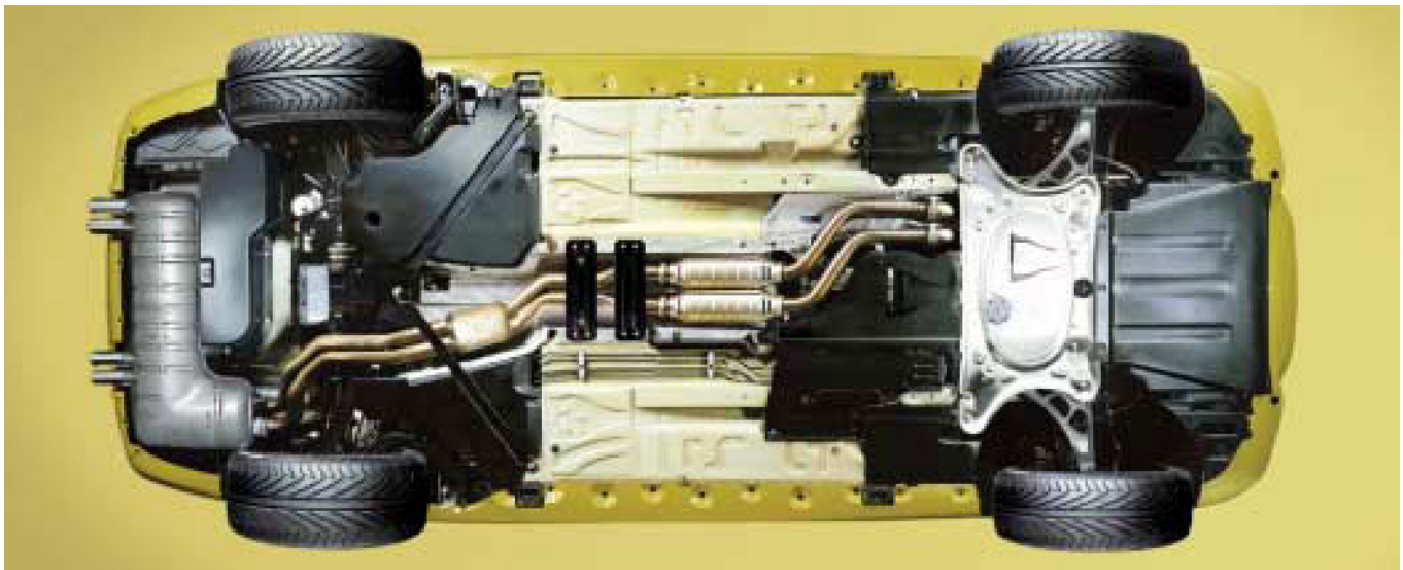

Bild 1: Bodengruppe mit Abgasanlage

Figure 1: Platform with exhaust system

3 Konstruktion

Zur Umsetzung der Entwicklungsziele wurden Auspuffkrümmer und Abgasanlage sowie sämtliche Aufhängungs- und Befestigungselemente neu konstruiert. Die bei BMW M mit dem CAD-System CATIA erstellten 3D-Daten werden durchgängig in der Prozesskette (Berechnung, DMU, Fertigung, Qualitätssicherung) verwendet. Die direkte Weiterverwendung der CAD-Daten war die Grundlage für eine kurze und effektive Entwicklungszeit.

4 Bauteilgestaltung

4.1 Auspuffkrümmer

Die Konstruktion der Auspuffkrümmer fand konsequent nach den Erfordernissen der Ladungswechselberechnung statt. Beim M3-Motor werden deshalb Auspuffkrümmer in Rohrfächerbauweise verwendet, wie sie in der Regel nur bei Rennmotoren anzutreffen sind, **Bild 2**.

In sechs einzelnen Primärrohren mit gleicher Länge wird der Abgasstrom vom Auslasskanal bis zu den Sammelleitungen fortgesetzt. Eine zu den Steuerzeiten phasenrichtige Folge von Druck- und Sogwellen in der Abgasleitung ist die Vorraussetzung für einen guten Ladungswechsel. Stromabwärts sind deshalb nur Zylinder beziehungsweise Primärrohre an gemeinsame Sammelleitungen angeschlossen, deren Auslassventil-Öffnungszeiten sich nicht

Bild 2: Auspuffkrümmer des neuen M3 (ECE-Ausführung)

Figure 2: Exhaust manifold (ECE)

Die Verfasser

Christian Eichmüller *ist als Motorenkonstruktions-Ingenieur bei BMW M verantwortlich für die Konstruktion von Abgasanlagen der Sechszylinder-Motoren.*

Winfried Willeke *ist Technischer Leiter bei der ArvinMeritor Exhaust GmbH.*

Gerhard Hofstetter *ist verantwortlich für Motorakustik und Festigkeit der Abgasanlage bei BMW M.*

Peter Gauchel *ist Geschäftsführer bei ArvinMeritor Exhaust GmbH.*

oder nur geringfügig überschneiden. Aufgrund der Zündfolge des Motors (1-5-3-6-2-4) wurde deshalb die Zusammenführung von jeweils drei Zylindern 1-2-3 und 4-5-6 zu einer gemeinsamen Sammelleitung gewählt.

Die Rohre des Auspuffkrümmers werden durch Innenhochdruckumformung (IHU) hergestellt. In Zusammenarbeit mit der Firma ArvinMeritor entstand bereits 1992 – für den damaligen M3 – der weltweit erste Rohrfächerkrümmer in diesem Verfahren. Für die Auspuffkrümmer des neuen BMW M3 konnte das vorhandene Know-how zugrunde gelegt und weiter verfeinert werden. Sämtliche Primär- und Sekundärrohre sind trotz der komplexen Formgebung einteilig, wodurch etliche Steckstellen und deren Schweißnähte entfallen können und somit weniger Störstellen für den Abgasstrom entstehen. Außerdem wird eine Querschnittsabnahme in den Rohren vermieden, da weder Falten noch eingefallene Bögen bei der Herstellung auftreten.

Die enorme Kaltverfestigung bei der IHU-Fertigung führt zu einem stabilen Leichtbau. Mit einer Wandstärke von nur 1 mm ist der Auspuffkrümmer ausreichend dimensioniert. Die dünnwandige Ausführung begrenzt die thermische Trägheit beim Aufheizen. Dies war eine wesentliche Voraussetzung, um das Anspringverhalten des Katalysators zu verbessern. Zur Vermeidung von weiteren Wärmesenken und zur Reduzierung des Bauteilgewichts wurden sämtliche Verbindungsflansche neu und in Leichtbauweise konstruiert. Diese sind so gestaltet, dass möglichst wenig Masse direkt an die Rohrleitung angekoppelt ist. Die patentierten Flansche – zur Befestigung am Zylinderkopf – wurden gegenüber dem Vorgänger von Feinguss auf Blech, die Anzahl der Befestigungsschrauben von je vier auf je drei umgestellt, **Bild 3**. Dadurch ergibt sich im Detail eine Gewichtseinsparung von über 66 Prozent und obendrein eine bessere Pressungsverteilung an der Dichtfläche.

An der Verbindung zur Abgasanlage werden ebenfalls Blechflansche an Stelle von Schmiedeflanschen verwendet. Hier wird ein Gewichtsvorteil von 50 Prozent erreicht. Mit der Integration eines Längen- und Winkelausgleichs – für die Aufnahme von Wärmedehnung und Montagetoleranzen – kann somit auf einen teuren Wellrohrkompensator verzichtet werden. Da die Blechflansche eine völlige Neuentwicklung darstellen, mussten sich diese erst hinsichtlich Festigkeit, Verzug und Dichtheit bewähren. Trotz der komplexen Formgebung ist der Auspuffkrümmer für die Verwendung von Links- und Rechtslenkerfahrzeugen geeignet. Da der neue Motor des BMW M3 künftig auch im BMW M-Roadster und im M-Coupé verbaut wird, mussten die Einbauverhältnisse für diese Fahrzeuge zusätzlich berücksichtigt werden.

Für die USA-Länderausführung wurde ein eigener Auspuffkrümmer entwickelt. Aufgrund der motornahen Anordnung des Katalysators ist gegenüber der ECE-Ausführung ein anderer Rohrverlauf entstanden. Die konstruktiven Merkmale entsprechen dabei der ECE-Variante.

4.2 Abgasanlage und Schalldämpfer

Die zweiflutige Ableitung der Abgase wurde wegen der Vorteile beim Ladungswechsel bis in den Nachschalldämpfer fortgesetzt. Zur Reduzierung des Abgasgegendrucks fand eine möglichst drosselfreie Gestaltung der Bauteile statt.

Bild 3: Vergleich der Befestigungsflansche alt (links) und neu

Figure 3: Mounting flanges (old / new)

4.2.1 Vorrohre mit Katalysator

Für die Reinigung der Abgase ist in beiden Rohrsträngen je ein geregelter Dreiwege-Katalysator integriert. Pro Katalysator sind zwei zylindrische Metallträger (ø 105 mm) der Firma Emitec in Reihe geschaltet. Bei der Auslegung standen neben der Umsetzungsrate ein schnelles Anspringverhalten und die Begrenzung der Druckverluste im Vordergrund. Diesen Anforderungen konnte mit einer niedrigen Zellenzahl (200 pro Quadratinch) sowie der reduzierten Folienstärke (40µm) und einer Trimetall-Beschichtung der Firma Engelhard entsprochen werden.

Um der Reduzierung der Folienstärke hinsichtlich Festigkeit gerecht zu werden, wurde die Wicklung des Metallträgers (SM-Design) verbessert. Die Standfestigkeit des Katalysators ist durch eine höhere Eigenfrequenz, ein größeres axiales Widerstandsmoment, einer homogeneren Radialsteifigkeit und der größeren Lötfläche zwischen Matrix und Mantel deutlich höher.

Für die Anströmung der Katalysatoren werden IHU-Rohre verwendet. Mittels dieser Technik konnten die erforderlichen Querschnitte der doppelflutigen Abgasanlage und die strömungsgünstigen Übergänge (Diffusoren) realisiert werden. Nach den Katalysatoren sind die beiden Rohrstränge durch ein Interferenzrohr verbunden. Diese Übersprechstelle führt im mittleren Drehzahlbereich des Motors zu einem Anstieg des Drehmoments.

4.2.2 Auspuffrohrleitung mit Zwischenschalldämpfer

Nur durch spezielle IH-geformte Rohre konnten die erforderlichen Querschnitte im Bereich der Hinterachse untergebracht werden. Aufgrund der Kaltverfestigung bei der Herstellung kam es trotz dünner Wandstärken zu keiner Festigkeitsminderung. Ein weiterer Schritt in Richtung Leichtbau konnte somit erfüllt werden. Der Zwischenschalldämpfer hat ein Volumen von 1,8 dm^3. Der einteilige Gehäusemantel ist doppelwandig ausgeführt.

4.2.3 Nachschalldämpfer

Zur Verbesserung des Ladungswechsels sind Gasschwingungen mit großen Amplituden notwendig, während die Schalldämpfung eine Glättung dieser Schwingungen zu einem möglichst gleichmäßigen Abgasstrom erfordert. Der Nachschalldämpfer des M3 wurde deshalb überwiegend als Absorptionsdämpfer konstruiert, da diese Bauweise beide Anforderungen

Bild 4: Die komplette Abgasanlage

Figure 4: Entire exhaust system

am besten vereint. Die Wahl des Dämpfervolumens ist an das Hubvolumen ($V_{SD} = V_{Hub} \cdot X$) und an die Zielwerte des Motors gekoppelt. Für eine – ohne Leistungsverlust – wirkungsvolle Schalldämpfung durfte der Faktor „X“ nicht unter dem Zwölffachen des Hubvolumens liegen.

Nur durch eine M3-spezifische Änderung der Bodengruppe konnte ein großvolumiger Nachschalldämpfer (40 dm^3) quer – hinter dem Achsgetriebe – im Fahrzeugheck untergebracht werden. Das Gehäuse des Nachschalldämpfers besteht aus zwei tiefgezogenen Blechhalbschalen. Diese werden nach dem Innenaufbau miteinander verschweißt. Um Körperschall zu vermeiden, sind die zwar gewölbten, aber relativ großen Begrenzungsflächen durch Sicken und Böden versteift. Als Absorptionsmaterial wird beim M3 nur Glasfaser (Advantex) verwendet. Dieses Material kombiniert hohes akustisches Dämpfungsvermögen mit langer Beständigkeit bei geringem Gewicht. Zur Dämpfung der Zündfrequenz wurde eine Kammer des Nachschalldämpfers als Resonator abgestimmt. In dieser Kammer wird außerdem die doppelflutige Rohrführung zu den vier Auspuffendrohren verzweigt, **Bild 4**. Für den großvolumigen, querliegenden Nachschalldämpfer galt es, speziell die neue Form und Einbaulage im Fahrzeug zu erproben.

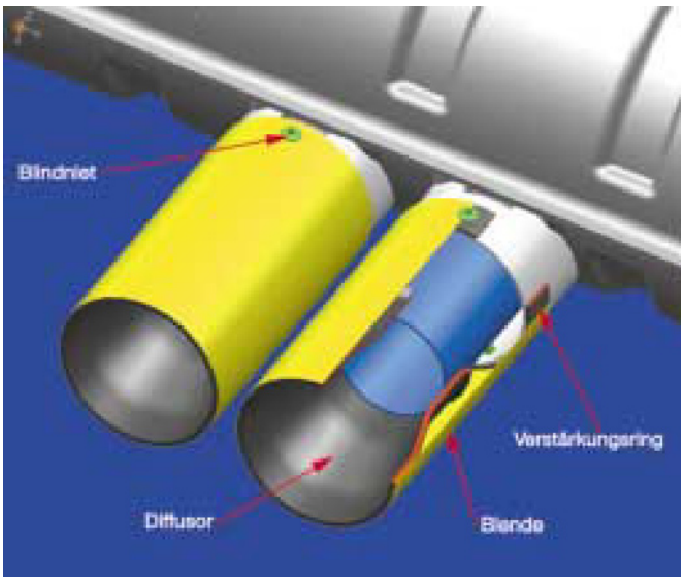

Bild 5: Schnittbild der Auspuffendrohre

Figure 5: Section view of exhaust tail pipes

Bild 6: Auspuffendrohre links nach einem Crash, rechts im Neuzustand

Figure 6: Comparison of exhaust tail pipes (new/after crash)

4.2.4 Auspuffendrohre

Mit je zwei zylindrischen, verchromten Auspuffendrohren, die paarweise in den beiden Ausschnitten der Stoßfängerverkleidung angeordnet sind, wird die sportliche Note des Fahrzeugs betont.

Bei einem Heckcrash sind die Auspuffendrohre, durch ihre exponierte Lage, fast unvermeidlich einer Kollision ausgesetzt. Um dennoch Schäden von der Auspuffanlage fern zu halten, wurden speziell für den BMW M3 neue Endrohre konstruiert und patentiert. Die neuen Endrohre verhindern bei einem Heckcrash bis zu 15 km/h, dass der Aufprallstoß weiter in die Abgasanlage vordringt und diese beschädigt. Erreicht wird dies durch eine entsprechend lange Knautschzone innerhalb der Endrohre, **Bild 5** und **Bild 6**. Bei Bedarf können die Endrohre mit geringem Reparaturaufwand einzeln ausgetauscht werden. Durch diese kundenfreundliche Lösung konnte der neue BMW M3 in einer günstigeren Versicherungsklasse eingestuft werden. Die neuen Endrohre wurden durch Korrosions- und Crashtests sowie durch Thermoschockversuche zusätzlich erprobt.

4.2.5 Aufhängung

Die Aufteilung der Last erfolgt durch mehrere Lagerstellen, wobei zwei Gummilager in der Mitte der Auspuffanlage und drei Gummilager am Nachschalldämpfer angeordnet sind. Die Kombination von hohen Temperaturen und Querbeschleunigungskräften in Verbindung mit den knappen Einbauverhältnissen erfordern eine hohe Standfestigkeit der Gummilager. Speziell die Aufhängungen im mittleren Bereich der Abgasanlage sind von den hohen dynamischen und thermischen Belastungen betroffen.

Zur Einschränkung der Querauslenkung sind diese Gummilager mit einer Metalleinlage versehen. Diese Lager geben einerseits der Abgasanlage die notwendige Quersteifigkeit, andererseits verhindern sie den störenden Schwingungsaufbau in den Fahrgastraum. Aufgrund der relativen Nähe zum Abgasrohr wurde außerdem die Gummimischung der Mittellager optimiert und temperaturbeständiger ausgelegt. Bei Dauerbelastung unter v_{max} werden am Lager Temperaturen bis zu 200 °C erreicht.

Die Festlegung der Shore-Härte in Kombination mit der Federblecheinlage sowie die Kontur der Gummilager wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Wegu teilweise rechnerisch (FEM-Berechnung) sowie auch empirisch ermittelt. Der Zielkonflikt zwischen Festigkeit und Akustik konnte so optimal gelöst werden.

4.2.6 Werkstoff und Gewicht

Mit Ausnahme der Metallträger im Katalysator bestehen sämtliche Metall-Bauteile der kompletten Abgasanlage aus hochtemperaturbeständigem, austenitischem Edelstahl. Durch die hohe Rost- und Säurebeständigkeit konnte die Haltbarkeit der Abgasanlage auf das Fahrzeugleben ausgedehnt werden.

Obwohl das Schalldämpfervolumen gegenüber dem Vorgänger (E36 M3) um über 50 % vergrößert wurde, konnte das Gewicht der Abgasanlage (inklusive Auspuffkrümmer) durch konsequenten Leichtbau auf dem Niveau des Vorgängers – also unter 50 kg – gehalten werden.

5 Abgasgegendruck

Aufgrund der drosselfreien Abgasleitungen und durch die großzügige Dimensionierung der Schalldämpfer wurde der Druckverlust auf 300 mbar bei 8000/min (unter Normbedingung) begrenzt und gegenüber dem Vorgänger (E36 M3) deutlich gesenkt.

6 Abgasemissionen

Mit den beschriebenen Maßnahmen wird beim neuen BMW M3 ein wesentlicher Beitrag zur Reinigung der Abgase geleistet. Der BMW M3 unterschreitet die Abgasgrenzwerte für EU3 deutlich, **Bild 7**. Für USA wird mit der motornahen Katalysatoranordnung LEV I erfüllt.

	HC	CO	NOx
Emmision [g/km]	0,09538	0,7171	0,0261
Grenzwert EU3	0,20	2,30	0,15
% Grenzwert	47,69	31,18	17,42

Bild 7: Die Abgas-Typprüfwerte

Figure 7: Chart of certificated emissions

Bild 8: Motorprüfstand für Dauererprobung

Figure 8: Test bed

7 Dauererprobung

Die Abgasanlage des neuen M3 musste sich mit allen ihren Neuerungen sowohl im Fahrzeug verbaut als auch in aufwendigen Prüfstandsdauerläufen, **Bild 8**, in speziellen, BMW M-spezifischen Dauerlaufprofilen immer wieder bewähren.

Hochlasttests auf dem BMW Testgelände in Miramas (Südfrankreich) über 40 000 km (entsprechen rund 200 000 km Autobahn) sowie 8000 km unter Rennbedingungen auf der Nürburgring-Nordschleife waren mehrfach zu absolvieren und zu bestehen. In Längs- und Querrichtung treten dabei Beschleunigungs- und Verzögerungswerte bis zu 1,1 g auf. Die Nürburgring-Erprobung stellt in etwa die zwanzigfache Belastung gegenüber dem normalen Straßenverkehr dar.

Die Alltagstauglichkeit sowie die länderspezifischen Anforderungen der Abgasanlage wurden in unzähligen Straßendauerläufen kundennah erprobt und abgesichert. Nach Dauerlaufende erfolgte für die einzelnen Teile der Abgasanlage eine Funktionsprüfung. Vor allem die Schweißnähte, Schiebesitze, Passung der Trennböden, die Füllmenge des Absorptionsmaterials im Nachschalldämpfer sowie die neuentwickelten Flanschdichtungen standen unter besonderer Beobachtung.

Durch die Betriebsschwingungsanalyse konnte bereits im Frühstadium der Entwicklung eine Aussage über die Dauerschwingfestigkeit der Abgasanlage getroffen und vorhandene Mängel beseitigt werden.

8 Akustik

Der neue BMW M3 sollte auch hinsichtlich der „Abgasanlagenakustik" die spezifischen Merkmale des Vorgängers – kerniger, sportlicher Sound ohne Komforteinbußen – verkörpern und noch stärker ausprägen.

Unter diesem Gesichtspunkt ergaben sich unter den schon bekannten Anforderungen folgende Entwicklungsschwerpunkte:

- Erfüllung des Außengeräuschgrenzwertes 75 dB(A)
- Niedriger Mündungspegel
- Minimierung der Körperschallabstrahlung
- Dezent, sportive Innenraumakustik.

8.1 Außengeräusch

Erschwerend für die Außengeräuschentwicklung des neuen BMW M3 war die zusätzliche Anforderung der fahrleistungsoptimierten Auslegung hinsichtlich Getriebe-/Achsübersetzung. Die hohe Ausfahrdrehzahl der Vorbeifahrtmessung spiegelt sich grundsätzlich im Ergebnis mit einem höheren Vorbeifahrtpegel wieder. Zur Erfüllung des Außengeräuschgrenzwertes nach Lex Ferrari 75 dB(A) war es deshalb notwendig alle Geräuschquellen des BMW M3 zu optimieren. Eine ausgewogene Quellenverteilung musste dazu entwickelt werden.

Mit dem querliegenden Nachschalldämpfer konnte das für die Abgasanlagenakustik notwendige Dämpfungsvolumen realisiert werden. Durch die gezielte Aufteilung in Reflexion und Absorption konnten die Vor-

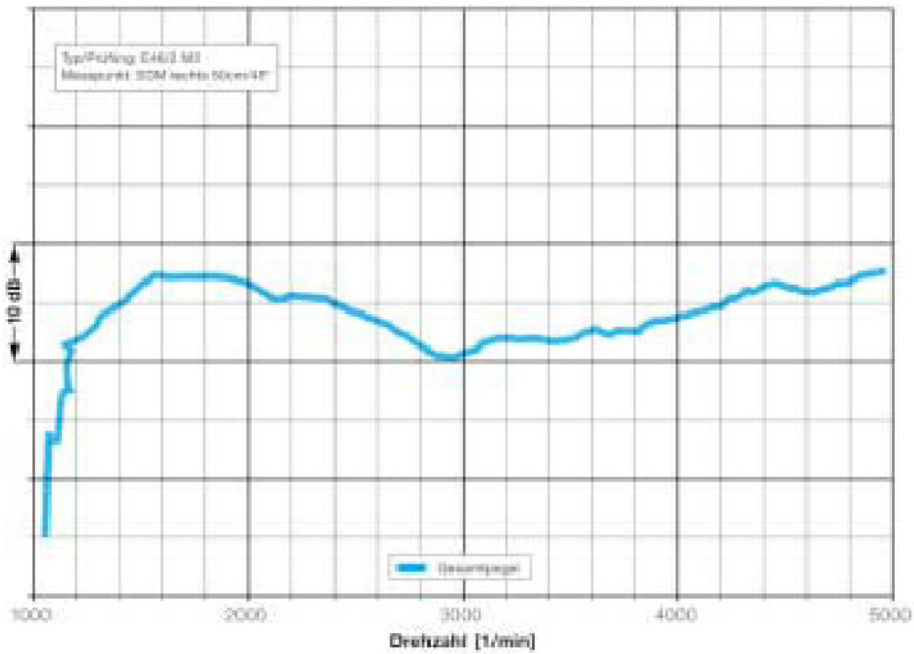

Bild 9: Schalldämpfer Mündungspegel

Figure 9: Tailpipe noise characteristic

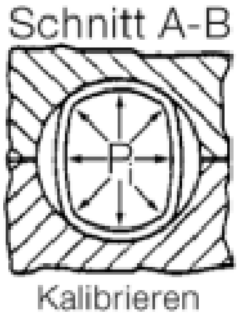

Bild 10: Schema für das Kalibrieren

Figure 10: Calibration prinziple

Bild 11: Schema für das Aufweitstauchen

Figure 11: Flaring prinziple

teile der breitbandigen mit einer schmalbandigen Dämpfung kombiniert werden.

Mit Hilfe der Reflexionskammer war es speziell möglich, den Mündungsschallpegel – also die Ordnung der Zündfrequenz im Hinblick auf die beschleunigte Vorbeifahrt – bestmöglichst zu optimieren, **Bild 9**. Die Abstimmung der Resonanzkammer erfolgte empirisch in mehreren Entwicklungsschritten.

Mit dem Zwischenschalldämpfer konnte im Rahmen der gesetzlichen Vorschriften der rennsportartige Auspuffsound des neuen BMW M3 geformt werden. Mittels Pegelmessungen im Nahfeld wurde die Größe und Lage des Zwischenschalldämpfers abgestimmt. Der Verzicht auf Absorptionswolle prägt zusätzlich den kernigen Sound.

Die Abstrahlgeräusche der Bauteiloberflächen konnten mit der gezielten Anordnung von Sicken deutlich reduziert werden. Die ovalen oder runden Bauteilgeometrien tragen zur Erhöhung der Formsteifigkeit dieser Bauteile bei. Mit Ausnahme des Zwischenschalldämpfers sind alle Rohr- und Dämpfereinheiten einwandig gestaltet.

8.2 Innenraumakustik

Ein Sportwagen wie der neue BMW M3 erhebt nicht den Anspruch einer limousinenhaften, leisen Innenraumakustik. Dennoch sind deutlich spürbare Vibrationen sowie unangenehme Resonanzen im Innenraum unerwünscht. Durch Anpassen der wirksamen Endrohrlänge auf das Nachschalldämpfervolumen konnte das tieffrequente Brummgeräusch (< 100Hz), das hauptsächlich von den Fondpassagieren als äußerst störend wahrgenommen wird, deutlich entschärft werden. Mit dieser Maßnahme entstand eine Synthese aus Soundanforderungen und Komfortansprüchen.

Unter Last vermittelt die Abgasanlagenakustik dem Fahrer ein kraftvolles und sportliches Feedback. Die deutliche akustische Rückmeldung über Last- und Drehzahlzustand des Motors wird durch ein prägnantes Ansauggeräusch zusätzlich unterstützt. In allen anderen Fahrzuständen zeigt die Abgasanlage des neuen M3 ihre

akustische Alltagstauglichkeit. So kann der M3 falls gewünscht auch über längere Fahrstrecken komfortabel und ohne unangenehme Lautstärken bewegt werden.

Die Aufhängungselemente wurden so gestaltet, dass im Innenraum keine unerwünschten Schwingungen und Geräusche auftreten.

9 Fertigung

Um den Anforderungen der Konstruktion, geringstmöglicher Abgasgegendruck und maximale Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Bauraums im Unterboden, gerecht zu werden, wurden alle Rohre vom Krümmer bis zum Nachschalldämpfer in Hydroumformtechnik realisiert. Diese Technik stellt die zur Zeit einzige Möglichkeit dar, um den hohen Qualitätsanforderungen an ein sportlich abgestimmtes Abgassystem gerecht zu werden. Die Hydroformtechnik gewährleistet neben der Erfüllung der konstruktiven Vorgaben – zum Beispiel den Rohrquerschnitt variabel an den Bauraum anpassen zu können – auch die Einhaltung engster Toleranzen, die eine Roboterverschweißung auch bei geringen Wandstärken prozesssicher zulässt.

9.1 Biegetechnik

In der ersten Fertigungsstufe müssen die Rohre für das Hydroumformen vorgebogen werden. Enge Radien und geringe Wanddicken erforderten die Entwicklung einer elektrischen Biegemaschine mit CNC-gesteuertem Werkzeugwechsler. Die Maschinen wurden in enger Zusammenarbeit der Firmen ArvinMeritor und Addison entwickelt und zur Serienreife gebracht.

Insgesamt werden für die ECE- und US-Variante 21 unterschiedliche Biegeteile mit kleinsten Radien in hoher Maßgenauigkeit benötigt. Dies wird erreicht durch den Einsatz einer voll elektrischen Druck-/Biegemaschine. Die Maschine verfügt über 13 CNC-gesteuerte Achsen und einem Werkzeugmagazin mit 16 Satz Konturwerkzeugen. Jede Achse ist einzeln programmierbar. Der Biegetechnik kommt also als vorbereitende Fertigungsstufe vor der Hydroumformung eine Schlüsselrolle zu.

9.2 Innenhochdruckumformung

Bei der Innenhochdruckumformung werden die Rohre von innen mit hydraulischem Druck, der in Abhängigkeit von Material und Wanddicke zwischen 2000 und 2800 bar liegt, im Werkzeug umgeformt. Für die M3-Anlage werden im Wesentlichen die zwei Arten Kalibrieren und Aufweitstauchen eingesetzt.

Beim Kalibrieren werden vorgeformte Rohre durch Innendruck (zum Beispiel 2500 bar) in einem geschlossenem Werkzeug gegen die Werkzeugwand gepresst, **Bild 10**. Um die gewünschten Umformgrade zu erreichen, werden die vorgebogenen Rohre in der Regel vor der Umformung geglüht. Beim Aufweitstauchen wird durch axiales Nachschieben zusätzlich Werkstoff in die Umformzone eingebracht. Mit diesem Verfahren lassen sich sehr große Aufweitungen realisieren, **Bild 11**.

Die Kombination der beiden Methoden erlaubt komplexe Bauteile, die teilweise einen kalibrierten Rohrverlauf und an einem oder beiden Ende(n) größere Aufweitungen aufweisen. Dieses Verfahren ist zum Beispiel an den Katalysatorkonen erfolgreich angewandt worden. Dadurch konnten geschweißte Halbschalen mit angeschweißtem Rohr durch nur ein Bauteil ersetzt werden.

Alle 21 Rohre werden durch Innenhochdruckumformung in ihre endgültige Form gebracht. Dazu sind Innenhochdruckpressen mit einer Schließkraft von 2.500 t und 10 CNC-Achsen im Einsatz. Alle Bauteile werden durch Roboterhandling dem Innenhochdruckumformprozess zugeführt. Die so erreichten Aufweitgrade liegen bei den Katalysatorkonen bei über 80 %, **Bild 12**.

Wirtschaftlich ist der Einsatz von IHU ebenfalls ein Erfolg. So konnten die Kosten durch Minimieren der erforderlichen Schweißnähte und die Integration der erforderlichen Formgebung optimiert werden. Gegenüber herkömmlicher Umformung aus Halbschalen oder mehrstufigen Prozessen entsteht so ein deutlicher Kostenvorteil. Als Beispiel für ein integriertes Bauteil ist das Sammelrohr für die ECE-Krümmer zu nennen. Die beiden Sammelrohre werden als ein Rohr vorgebogen, geglüht und innenhochdruckumgeformt. Nach der Umformung wird das Bauteil durch Sägen in die zwei erforderlichen Bauteile getrennt. Bei herkömmlicher Fertigung würde dieses Bauteil aus mindestens sechs Einzelteilen durch Schweißen zusammengesetzt. Neben der Vielzahl der zu verarbeitenden Einzelteile wären die vielen Schweißnähte ein erhebliches Lebensdauerrisiko.

9.3 Zusammenbau

Für die weitere Verarbeitung der nun hochpräzisen, innenhochdruckumgeformten Rohr- und Formteile werden nur modernste Schweißroboter und Sonderschweißmaschinen eingesetzt. Alle Schweißnähte werden maschinell ausgeführt, um eine gleichbleibend hohe Qualität zu gewährleisten. Als Schweißverfahren kommen WIG und MAG gepulst zur Anwendung.

Als Highlight hervorzuheben ist die Verschweißung des Nachschalldämpfers. Alle Außennähte werden bei diesem Bauteil in einer einzigen Aufspannung geschweißt. Die umlaufende Dichtnaht der beiden Halbschalen wird ohne abzusetzen unter einer als Manipulator ausgelegten Zuhaltepresse geschweißt (10 t Schließkraft). Um eine schlupf- und torsionsfreie Fixierung der zu Beginn der Schweißung noch losen Halbschalen sicher zu stellen, werden die beiden Werkzeughälften getrennt durch je einen CNC-gesteuerten Motor angetrieben. Die Motoren sind dabei digital als „elektrische Achse" geschaltet und werden von der Robotersteuerung synchronisiert.
Den Erfordernissen des sehr engen Bauraums im Fahrzeugboden konnte somit entsprochen werden. Ebenso müssen die Endrohre, als wichtiges Designmerkmal, mit der Heckschürze sauber fluchten und der Linie des Stoßfängers folgen. All diese Punkte konnten mit der beschriebenen Methode realisiert werden.

Bild 12: IHU Bauteile für den Abgaskrümmer (USA-Ausführung)

Figure 12: Internal high-pressure component of the exhaust manifold (US)

10 Zusammenfassung

Der Hochleistungsmotor und die neu entwickelte Abgasanlage des BMW M3 sorgen durch ihr perfektes Zusammenspiel für eine äußerst spontane Leistungsentfaltung, die obendrein durch eine sportlich, kernige Soundabstimmung begleitet wird. Zur Freude am sportlichen Fahren geschieht dies beim M3 äußerst umweltverträglich. Gegenüber der Abgasanlage des Vorgängermodells wurden einige grundsätzliche Veränderungen zur Erreichung der Hauptziele Abgasgegendruck und Leichtbau vorgenommen. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die wesentlichen Neuerungen wie Blechflansche und Dichtungen; dünnwandige IHU-Bauteile; Katalysator-Metallträger mit Folienstärke 40µm; Nachschalldämpfer und Endrohre sowie Gummilager gelegt. Mit innovativen Fertigungsmethoden konnte zudem eine wirtschaftliche Herstellung mit hoher Qualität erreicht werden. ■

MTZ worldwide

You can read the English version of this article in **MTZ worldwide**.

Subscription Hotline:
++49 / 6 11 / 78 78 151