

„Enabling  
Technology“  
für zukünftige  
Dieselmotoren

Veröffentlicht in: MTZ extra, Juni 2016.  
Springer Fachmedien Wiesbaden.

#### Autoren

- » Dipl.-Ing. Markus Kolczyk, Vice President Engineering Automotive OEM
- » Dr.-Ing. Gunnar-Marcel Klein, Vice President Engineering Filter Elements
- » Dr.-Ing. Harald Banzhaf, Vice President Liquid Filtration
- » Dipl.-Ing. Gunther Kraft, Director Engineering Liquid Filter Systems
- » Dipl.-Ing. Jochen Reyinger, Manager Development Fuel Filter Elements

Die rasant gestiegenen Forderungen nach partikel- und wasserfreiem Dieselkraftstoff lösten einen Entwicklungsschub der Filtertechnologie aus. Die jetzt erreichten Abscheidegrade bieten für Dieseleinspritzsysteme mit SOP bis Ende dieses Jahrzehnts genug Handlungsspielraum, auch beim Einsatz in Schlechtkraftstoffländern.

#### Rahmenbedingungen

Für die Entwicklung und Optimierung von Verbrennungsmotoren ist die Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kraftstoffverbrauch zum dominierenden Treiber geworden. Aus den Grenzwerten sind klare „Roadmaps“ für die Technologien ableitbar. Um diese Ziele zu erreichen, werden zum einen Hybridisierungen und zum anderen Optimierungen der Verbrennungsmotoren selbst umgesetzt. Im Bereich der Verbrennungsmotoren ist der Dieselmotor eine hoch attraktive Antriebsquelle, die aufgrund ihrer Effizienz eine hervorragende Option zur Erreichung der Emissionsziele darstellt.

In Europa ist die Dieselmotortechnik zur Erreichung der Grenzwerte der Euro-6-Gesetzgebung ein wesentlicher Faktor. Dies spiegelt auch der Marktanteil von etwa 50 % in Westeuropa wider. Die technische Entwicklung ist hier ebenfalls am weitesten fortgeschritten, sodass neben der reinen Kraftstoffeffizienz auch Leistung, Leistungscharakteristik und Komfort des Dieselmotors auf höchstem Niveau liegen. Ob weitere Potenziale in Ländern wie China und Indien erschlossen werden können, wird davon abhängen, ob die neuesten Technologien der Dieseleinspritztechnik in Märkten eingesetzt werden können, die heute noch nicht die höchste Evolutionsstufe verwenden.

Ein Charakteristikum hoch entwickelter Einspritzsysteme ist ein hoher Einspritzdruck, der im Laufe der Entwicklung bis auf aktuell 2.500 bar gesteigert wurde<sup>5,6</sup>. Doch sind bereits weitere Anhebungen auf bis zu 3.000 bar in Vorbereitung<sup>7</sup>. Diese Hochleistungssysteme, insbesondere die Injektoren, stellen entsprechende Ansprüche an die Kraftstoffqualität, insbesondere an die Reinheit bezüglich Partikel und Wasser. Die Kraftstoffqualität von Diesel ist weltweit nicht einheitlich<sup>4</sup>, was verhindert, dass weltweit der neueste

und beste verfügbare Stand der Technik an Dieseleinspritzsystemen eingesetzt werden kann. Durch den Einsatz von Hochleistungs-Dieselmotorkraftstofffiltersystemen können selbst in Gebieten mit schlechter Kraftstoffqualität die modernen Einspritzsysteme geschützt werden. Dies ermöglicht, auch in diesen Regionen effizienteste Dieselmotoren mit geringem Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß einzusetzen.



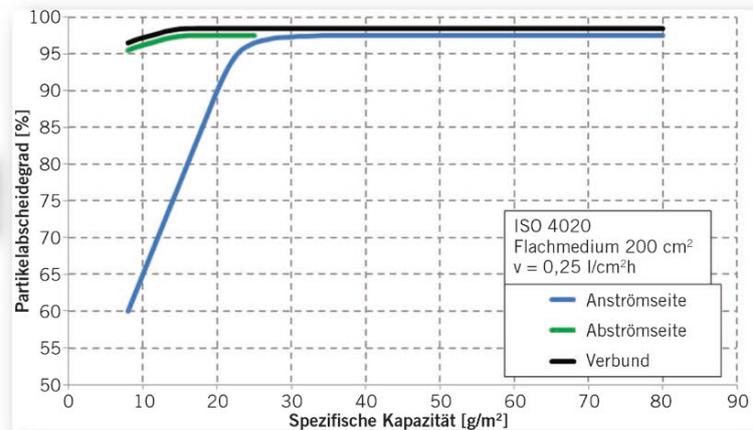
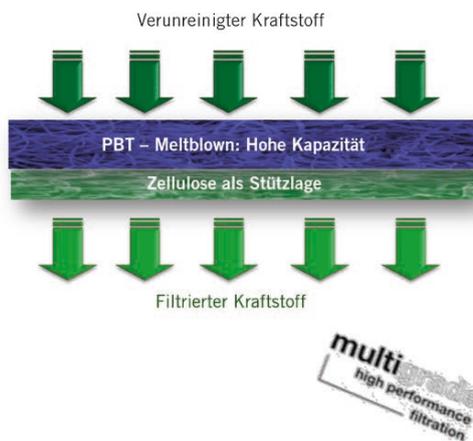


BILD 1: Aufbau und Funktionsweise eines zweilagigen Filtermediums mit Hochleistungs-Meltblownlage und Feinfilterlage (© MANN+HUMMEL)

## Steigerung der Filterleistungsdaten

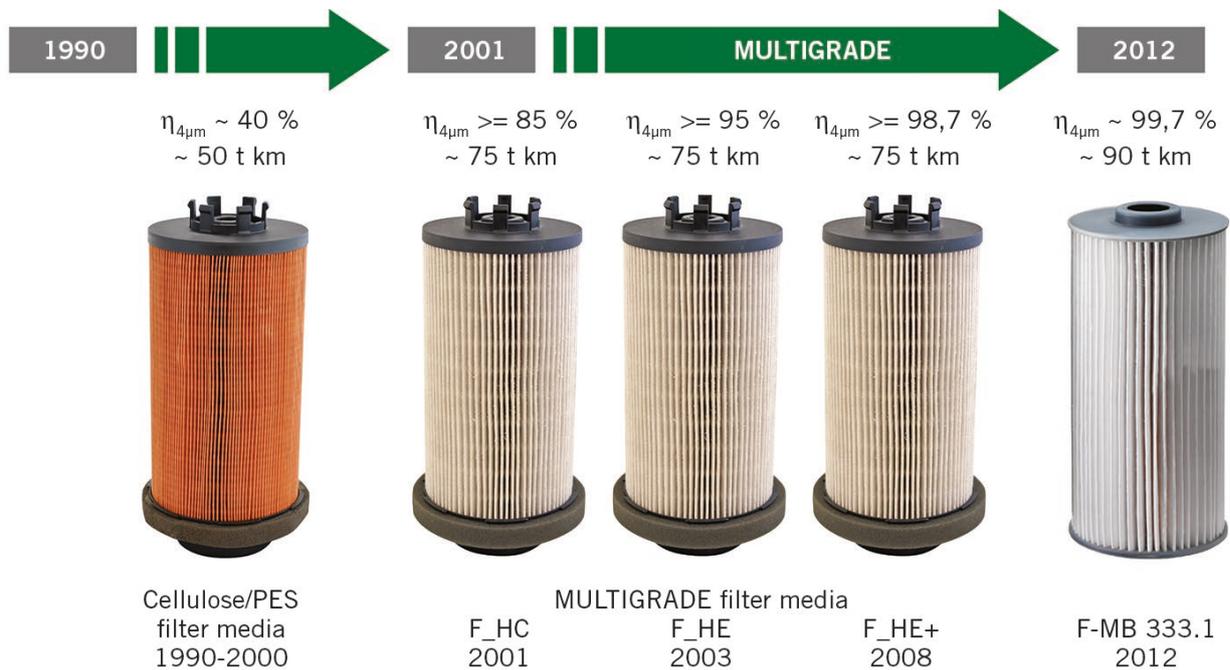
Als klassische „Enabling Technology“ machen Kraftstofffilter den zuverlässigen Betrieb moderner Dieseleinspritzsysteme in der Praxis erst möglich. Mit der Entwicklung immer leistungsfähigerer und feinerer Filter hat MANN+HUMMEL auf diesem Gebiet wiederholt neue Trends gesetzt. Jetzt steht ein neuer Technologiesprung bevor, der erhebliche Leistungssteigerungen bei Standzeiten und der Filterfeinheit bringen wird.

Die Leistung eines Filters kann beschrieben werden durch das Produkt aus dem  $\beta_x$ -Wert (Kehrwert des Fraktionsabscheidegrads für eine Partikelklasse  $x$ ; für Kraftstofffilter werden Partikel  $x \geq 4 \mu\text{m}$  betrachtet, als geringste gemäß ISO 19438 auswertbare Partikelfraktion) und der Schmutzkapazität in [g] gemäß Prüfung nach ISO 4020. Diese Prüfung hat sich als die bestgeeignete erwiesen, wenn es um die Übertragung von Laborergebnissen auf Praxisstandzeiten geht.

Der Hebel zur Steigerung der Filterleistung liegt vor allem in der Gestaltung des Filtermediums. Die prinzipiellen Möglichkeiten der Anordnung faserbasierter Tiefenfiltermedien in zylindrischen Bauräumen sind in<sup>1</sup> beschrieben. Anfang des vergangenen Jahrzehnts begann der Technologiewechsel von den bis dahin dominierenden sterngefalteten Zellulosemedien zu zweilagigen Filtermedien in gradiertem Aufbau und unter Verwendung sogenannter Meltblown-Fasern. Die Funktionsweise dieser Filtermedienklasse<sup>2,3</sup> ist in BILD 1

dargestellt. In der Vorfilterlage werden etwa 80 % aller Partikel des einströmenden verunreinigten Dieseldieselkraftstoffs abgeschieden und gespeichert (entspricht der Fläche unter der Abscheidegradkurve der Meltblown-Filterlage, „Upstream layer“). Die nachgeschaltete sehr dichte Zellulose-Feinfilterlage („Downstream layer“) weist für sich betrachtet nur eine geringe Speicherfähigkeit für Partikel auf. Da aber nur 20 % aller Partikel auf diese Lage treffen, ergibt sich eine ausreichend hohe Schmutzspeicherfähigkeit des Composites. Gegenüber einem konventionellen einlagigen Zellulosemedium gleicher Filterfeinheit gelingt so eine Leistungssteigerung um den Faktor 23.

Basierend auf diesen im Markt unter dem Namen MULTIGRADE F eingeführten Filtermedien hat die Filtertechnologie für Dieseldieselkraftstofffilter in den vergangenen Jahren eine rasante Entwicklung erlebt, BILD 2. Dieseldieselkraftstofffilter wiesen Ende der 1990er Jahre Abscheidegrade für  $4 \mu\text{m}$  große Partikel im Bereich von 20 bis 40 % auf. Im vergangenen Jahrzehnt konnte MANN+HUMMEL diesen Wert mittels der neu entwickelten MULTIGRADE F Filtermedien auf 85 % (MULTIGRADE F\_HC) und sukzessive weiter auf 95 % (MULTIGRADE F\_HE) und 98,7 % (MULTIGRADE F\_HE+) steigern. Heute werden in Serienprodukten Filterfeinheiten von 99,7 % (MULTIGRADE FMB 333) erreicht, womit ein Produktportfolio bereitsteht, das den Schutz aktueller Common-Rail-Einspritzsysteme bei unterschiedlichen Einsatzbedingungen sicherstellt, BILD 2.



Evolution of diesel fuel filter technology in the years 1990-2012

BILD 2: Entwicklung der Dieselmotorkraftstofffilter-Technologie in den Jahren 1990 bis 2012 (© MANN+HUMMEL)

Nachdem Dieselmotorkraftstofffilter mit Medien der MULTIGRADE F Technologie in der Mehrzahl aktueller Fahrzeuge zum Einsatz kommen, fokussiert sich die Weiterentwicklung in den vergangenen zwei Jahren auf Mehrlagenfiltermedien mit ausschließlich synthetischen Feinstfasern.

BILD 3 zeigt den Aufbau eines für den Einsatz in kommenden Fahrzeuggenerationen vorgesehenen Filtermediums dieser neuen Generation. Das Grundprinzip der oben beschriebenen MULTIGRADE F Medien wurde beibehalten. Es handelt sich weiterhin um ein zweilagiges Medium mit Vor- und Feinfilterlage. Der Unterschied besteht in den um den Faktor  $\geq 20$  geringeren Faserdurchmessern der Mikroglasfasern. Die durch eine abströmseitig angeordnete Feinfilterlage definierte Filterfeinheit kann damit vom aktuellen Bestwert 99,7 % auf nunmehr 99,99 % angehoben werden. Trotz signifikanter Steigerung der Filterfeinheit bleibt dabei das Filterwechselintervall konstant erhalten.

Gegenüber Filterelementen, die mit dem Filtermedium MULTIGRADE F-MB 333 ausgerüstet sind, BILD 2, wird mit MULTIGRADE FG 10000 eine Leistungssteigerung um den Faktor 30 erzielt. Damit stehen den Motorenentwicklern die Rahmenbedingungen zur Verfügung, um auch zukünftig zu erwartende Entwicklungsstufen der Common-Rail-Technologie in den Weltmärkten sicher zu betreiben.

Eine weitere Entwicklungsrichtung stellen Kraftstofffiltermedien des Typs MULTIGRADE FS dar. Hierbei wird die Zellularlage, BILD 1, durch eine Filterlage aus synthetischen Feinstfasern ersetzt. Diese vollsynthetischen und glasfaserfreien Filtermedien können aus zwei oder auch mehreren filteraktiven Lagen bestehen und erreichen heute bereits Filterfeinheiten von 99,95 % (MULTIGRADE FS 2000).

### Wasserabscheidung

Bei den stetig steigenden Einspritzdrücken nehmen jedoch nicht nur Partikel schädigenden Einfluss auf die sensitiven Bauteile, sondern auch Wasser, das in gelöster oder freier Form in Kraftstoffen vorliegen kann. Durch Befüllungsvorgänge, Transport, Lagerung und besonders Tankventilation kann Wasser direkt, oder in Form von Luftfeuchtigkeit in Tanks gelangen<sup>8,9,10</sup>. In dispergierter Form sind je nach Anwendung unterschiedliche Tropfengrößen etabliert. Saugseitig liegt die mittlere Tropfengröße im Bereich von  $d_{3,50} = 150 \mu m$ , druckseitig im Bereich von  $d_{3,50} = 10 \mu m$ . Gelangt Wasser zum Einspritzsystem, kann es dort zur Korrosion und MIC (mikrobiell induzierte Korrosion), Mangel-schmierung sowie zu Abrasion durch Kavitation kommen<sup>10, 12, 13</sup>.

Um Wassertropfen aus Diesel abzuscheiden, wird das Prinzip der koaleszenzbasierten Wasserabscheidung aus Diesel bereits mit hoher Effizienz umgesetzt. Dabei gibt es verschiedenstufige Konzepte, die selbst höchsten Anforderungen auf kleinstem Bauraum gerecht werden<sup>11,14</sup>. Das aktuell leistungsstärkste Konzept der Wasserabscheidung in-situ ist das dreistufige Dieselfilter-konzept, BILD 4, das neben der Partikelfiltration zusätzlich zwischen 90 % und 100 % Wasserabscheidung realisiert<sup>14</sup>.

In einer ersten Stufe werden Partikel separiert, um höchste Kraftstoffreinheit zu garantieren. In einer zweiten Stufe erfolgt die Koaleszenz der Tropfen. Die koaleszierten Tropfen können dann in einem Sedimentationsspalt sedimentieren. Vom Dieselvolumenstrom mitgenommene Tropfen werden zusätzlich an einer dritten Stufe, einem hydrophoben Endabscheider, abgeschieden.

Die Prüfnorm ISO/DIS 16332, die aktuell unter starker Mitarbeit von MANN+HUMMEL überarbeitet wird, schreibt wesentlich kleinere Tropfengrößen vor, als bisher in Prüfungen verwendet werden müssen. Dies gibt den Anwendungs-

fall in Fahrzeugen deutlich besser wieder. Eine kleinere Ausgangstropfengröße erschwert die Koaleszenz. Auch die Verwendung von handelsüblichem Tankstellendiesel stellt erschwerte Bedingungen aufgrund der komplexen Wechselwirkungen grenzflächenaktiver Inhaltsstoffe dar. Durch die gezielte Kombination von Oberflächen- und Tiefenkoaleszenz in dreistufigen Wasserabscheidungskonzepten können dennoch die erforderlichen sehr hohen Wasserabscheidegrade erreicht werden.

### Weitere Funktionsintegration: Elektrische Kraftstoffvorwärmung und Sensoren

Um auch im Winter bei extremen Temperaturen einen problemlosen Fahrzeugstart zu gewährleisten, ist eine kontinuierliche Kraftstoffversorgung des Einspritzsystems unumgänglich. Dieseldieselkraftstoff bildet bei Temperaturen unterhalb des Cold Filter Plugging Points (CFPP) feste Bestandteile, die sich beim Durchströmen des Filterelements auf dessen

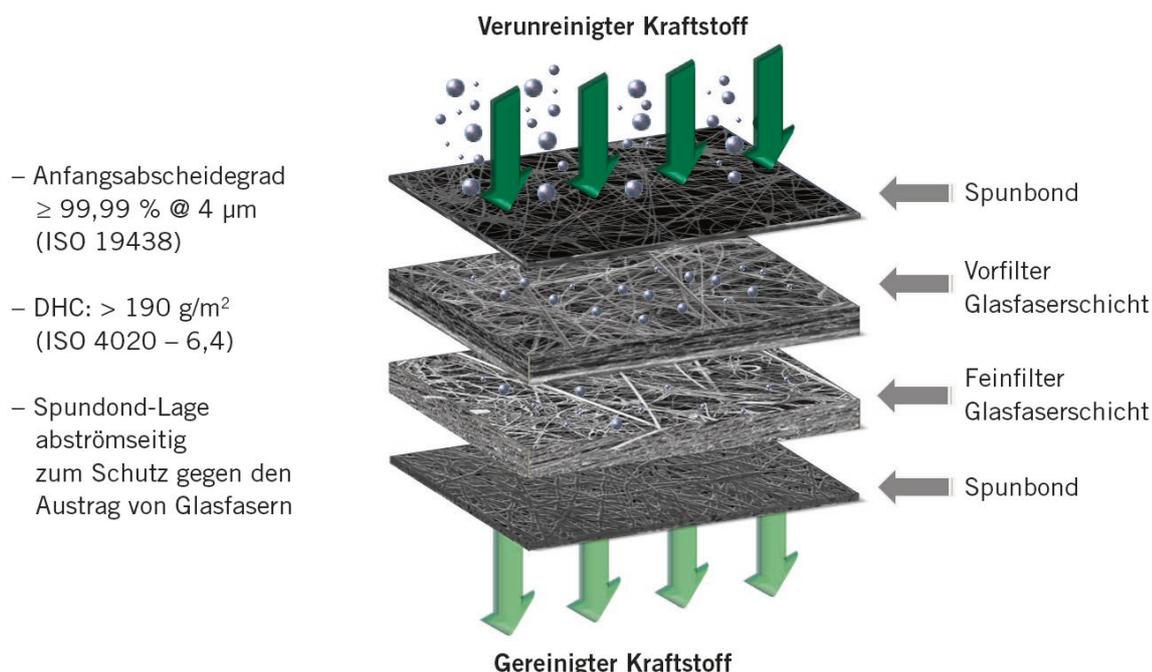


BILD 3 Schematischer Aufbau des neu entwickelten vollsynthetischen Filtermediums MULTIGRADE F-G 10000 (© MANN+HUMMEL)

Oberfläche ablagern und den Filter verstopfen. Um dies zu verhindern, muss im Motorbetrieb unterhalb des CFPP dem Kraftstoff zusätzliche Energie zugeführt werden, um die festen Dieselanteile (Paraffine) vor dem Filter aufzuschmelzen. Diese Aufgabe lässt sich unter anderem durch eine elektrische Kraftstoffheizung realisieren. Diese befindet sich im Allgemeinen rohrrseitig vor dem Filterelement und erwärmt im Kaltstart mittels elektrischer Energie den Kraftstoff. Um eine Überhitzung und daraus resultierende Folgeschäden im Fehlerfall zu vermeiden, basieren alle gängigen elektrischen Heizsysteme in Kraftstofffiltern auf Heizelementen mit einem positiven Temperaturkoeffizienten (PTC). Sie haben den Effekt, dass bei Erreichen einer maximal zulässigen Heizelement-Temperatur die Heizleistung signifikant absinkt und somit ein Überhitzen der Heizung verhindert wird. Allerdings hat diese Charakteristik auch zur Folge, dass die Auslegung der PTC-basierten Heizsysteme mit hoher Leistungsdichte einen starken Fokus auf die relevanten Betriebspunkte erfordert.

Die Bedeutung der elektrischen Vorwärmsysteme im Niederdruckkreislauf zur Erhaltung einer guten Kaltstartfähigkeit hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen.

Dieser Trend wird einerseits durch steigende Bio-Anteile im Kraftstoff und die dadurch bedingten verschlechterten Kaltfließigenschaften hervorgerufen. Durch immer effizientere Motoren und Niederdruckkreisläufe werden andererseits die auf den Kaltstart positiven Abwärme-Effekte vom Verbrennungsmotor und Hochdruckpumpe geringer.

Um trotz der steigenden Anforderungen auch bei extremen Witterungsbedingungen ein Versulzen des Kraftstoffsystems zu vermeiden, gibt es verschiedene Lösungsansätze.

Das größte Potenzial bietet hierbei die Verbesserung der Kaltstartfähigkeit durch einen höheren Energieeintrag in den Kraftstoff. Dies wird primär durch die Erhöhung der effektiven elektrischen Heizleistung erreicht. Bei Beibehaltung des zur Verfügung stehenden Bauraums bedeutet dies eine signifikante Steigerung der Leistungsdichte der Heizung.

Neben der reinen Erhöhung der maximalen elektrischen Heizleistung bietet vor allem die effizientere Nutzung der Energie das größte Potenzial. Durch eine optimierte Strömungsführung in der Heizung, einen verbesserten Wärmeübergang zwischen den Heizelementen und dem Kraftstoff sowie eine weiterentwickelte Widerstands-Temperatur-Charakteristik der



1. Wasserabscheidung
2. Wassertropfenkoaleszenz
3. Partikelabscheidung

BILD 4: Dreistufiges Konzept eines Dieselfilters zur Partikelfiltration und Wasserabscheidung in-situ. Das Element wird von außen nach innen durchströmt. In dieser Reihenfolge ist als erste Stufe ein gefaltetes Partikelmedium, als zweite Stufe ein gewickeltes Koaleszermittel und als dritte Stufe ein hydrophober Endabscheider zu sehen. (© MANN+HUMMEL)



BILD 5: Funktionsprototyp mit bedarfsorientierter Heizung und integriertem Wassersensor (© MANN+HUMMEL)

Heizelemente wird dieses Ziel bei modernen Kraftstoffheizungen erreicht, BILD 5.

Um die zuvor beschriebenen Ziele bei aktuellen Neuentwicklungen umsetzen zu können, legt MANN+HUMMEL neben dem effizienten Design ein besonderes Augenmerk auf die Simulation und die Erprobung der Bauteile. Neben festigkeits- und produktionsspezifischen Simulationen werden für PTC-Heizungen auch Strömungs- und Wärmeübergangssimulationen durchgeführt. Hierdurch wird sichergestellt, dass eventuelle Schwachstellen in einer frühen Phase der Entwicklung erkannt und durch Anpassungen der Auslegung eliminiert werden können.

Eine umfassende Erprobung auf Funktionsprüfständen sowie eine realitätsnahe Erprobung der Bauteile in Kaltstartversuchen ermöglichen einen sicheren Nachweis der Funktion unter allen Einsatzbedingungen bereits vor der finalen Erprobung im Fahrzeug.

Zusätzlich zur reinen Heizfunktion ist eine weitere Funktionsintegration möglich und sinnvoll. Durch die Integration eines Wassersensors lässt sich das vom Wasserabscheider abgeschiedene Wasser detektieren und bei Erreichen des maximalen Wasserstands im Wassersammelraum ein Signal

auslösen. Durch die Integration der Sensor-Funktion in die elektrische Heizung lassen sich unter anderem Synergien bei der Anzahl der Bauteile, der Ausnutzung des vorhandenen Bauraums und der Schnittstellen zum Fahrzeug generieren.

Ein Beispiel, das all die zuvor beschriebenen Vorteile vereint, zeigt BILD 6. Hier werden auf extrem kompaktem Bauraum eine hocheffiziente PTC-Heizung mit bis zu 540 W Heizleistung und ein integrierter Wassersensor kombiniert. Gegenüber dem Vorgängermodul wurde die Standzeit deutlich erhöht, das Kaltstartverhalten signifikant verbessert und durch die Integration des Wassersensors ein Serviceindikator integriert.

## Ausblick

Die nun erreichten Abscheidegrade von  $\eta_{4\mu\text{m}} \geq 99,99\%$  bieten für Dieseleinspritzsysteme mit SOP genug Handlungsspielraum bis Ende dieses Jahrzehnts, insbesondere beim Einsatz in Schlechtkraftstoffländern. Erneute Leistungssteigerungen werden in Zukunft vermehrt durch Einsatz der Mikrostruktursimulation, inklusive Vorausberechnung der

Partikelabscheidung in komplexen mehrlagigen Tiefenfiltermedien erschlossen. Dieses wissensbasierte Faserdesign ist die Schlüsselkompetenz für die Bereitstellung technologieführender Filterelemente in der Zukunft. Die im Kraftstoff-Feinfilter integrierte Wasserabscheidung entwickelt sich immer weiter zum Standard. Die detaillierte Kenntnis des Einflusses der Dieseladditive auf Koaleszenz- und Abscheidvorgänge ist eine Voraussetzung für die Weiterentwicklung immer leistungsfähiger Diesel-/Wasserabscheider. Zunehmend werden automatische Systeme zum

sicheren Wasseraustrag während des Betriebs gefordert und eingesetzt. Die Integration weiterer Funktionen, wie eine elektrische Dieselheizung und gesteuerter Vorwärmventile runden das Leistungsprofil ab. Parallel bleiben die Notwendigkeiten einer optimalen Bauraumausnutzung im Motor- und Karosserieraum sowie einer maximalen Crashesicherheit bestehen. Damit entwickeln sich Dieselmotoren immer mehr zu High-Tech-Aggregaten, die den Einsatz der modernen Dieselmotortechnik in den verschiedenen Anwendungsgebieten und Märkten erst ermöglichen.

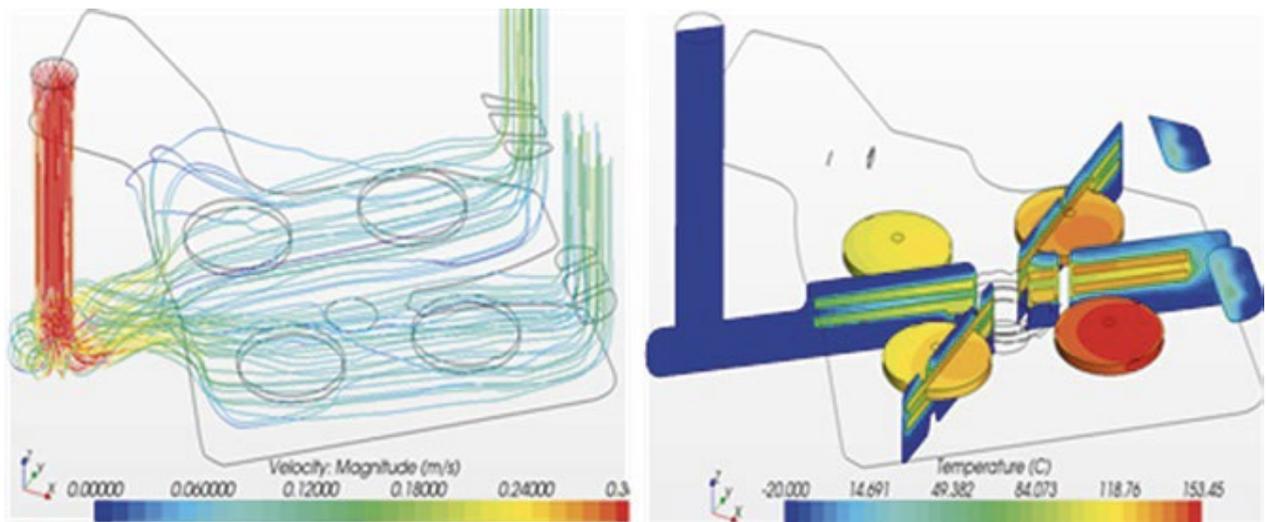


BILD 6: Simulation der Heizungsdurchströmung und der Temperaturverteilung in einer PTC-Heizung (© MANN+HUMMEL)

#### Literaturhinweise

- 1 Klein, G.-M.; Reyinger J.; Klein, M.: Dieselmotorenfilter: „Enabling Technologie“ für die moderne Dieselmotortechnik. In: M. Durst, G.-M. Klein (Hrsg.): Filtration in Fahrzeugen. Haus der Technik Fachbuch Bd. 75. Renningen: expert verlag, 2006, S. 5879
- 2 WO 99/26710 Filter Element
- 3 Klein, G.-M.; Banzhaf, H.; Durst, M.: Fuel filter solutions for future diesel injection systems. Proceedings 8th World Filtration Congress. Brighton, UK 2000, S. 887-990
- 4 ACEA, Alliance, EMA JAMA (Hrsg.): Worldwide fuel charter. Belgien, 2013
- 5 Lengenfelder et al.: Zukunft gestalten – Effiziente Bosch Einspritzsysteme für Nutzfahrzeuge. 35. Internationales Wiener Motorensymposium, 2014
- 6 Beduneau et al.: Die neue Delphi Diesel Common Rail Systemfamilie. 35. Internationales Wiener Motorensymposium, 2014
- 7 Diesel 3000 bar. Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Forschungsvorhaben AiF, Mai, 2014
- 8 Trautmann, P.; Reyinger, J.; Staudacher, U.; Schütz, S.: Water-diesel separation. Part I: Advances in testing and system development. Proceedings AFS Annual Conference, Louisville, USA 2011
- 9 Trautmann, P.; Schütz, S.; Reyinger, J.; Kraft G.: New routes for water separation from diesel fuel. In: MTZ 72 (2011), Nr. 7/8, S. 3034
- 10 Köhler, K.; Schuchmann, H.P. (Hrsg.): Emulgiertechnik: Grundlagen, Verfahren und Anwendungen. Behr's Verlag, Hamburg, 2012
- 11 Bosch Berufsschulinfo ([http://aa.bosch.de/aa/de/Berufsschulinfo/media/2005\\_7.pdf](http://aa.bosch.de/aa/de/Berufsschulinfo/media/2005_7.pdf)). (Stand 09.12.2014)
- 12 Brill, H. (Hrsg.): Mikrobielle Materialzerstörung und Materialschutz: Schädigungsmechanismen und Schutzmaßnahmen. Gustav Fischer Verlag Jena, 1995
- 13 Butt, H.-J., Graf, K., Kappl, M.: Physics and chemistry of interfaces. Wiley, 2005
- 14 Petiteaux, M.; Monsallier, G.: Impacts of biodiesel blends on fuel filters functions. Laboratory and Field Tests Results. SAE Technical Paper 2009011876, 2009

# Für jeden Motor das richtige Filter, oder weshalb Sie im MANN-Filterkatalog über 100 verschiedene Ölfilter finden



MANN-Wechselfilter für die Schmierölsreinigung werden in enger Zusammenarbeit mit den Motorkonstruktoren der Fahrzeug-Hersteller festgelegt. Sie sind auf die jeweiligen Motoren in allen Belangen ge-

nau abgestimmt. Verwenden Sie deshalb beim Filterwechsel nur Filter, die einwandfreie Funktion garantieren und so während der gesamten Laufzeit Ihres Motors den notwendigen Schutz bieten.

Es ist nicht möglich, ohne Nachteile für den Motor die Vielfalt des MANN-Typenprogramms durch wenige Einheitsfilter zu ersetzen. Für jeden Motor das richtige Filter: MANN-FILTER.

