



# Aufbau und Funktion der Veritas-Ladeluftsysteme



Verbinden, Dichten und Transportieren – das sind die Funktionen,  
die Veritas-Produkte im Automobil übernehmen.  
Aber dahinter steckt viel mehr.

## Inhaltsverzeichnis

Funktion des Ladeluftsystems	4
Beschreibung verschiedener Systeme	6
Eine typische Ladeluftstrecke	8
Emissionsgesetzgebung PKW	13
Simulation und Prüfungen	15
Ausblick	19



# 1. Funktion des Ladeluftsystems

Die Steigerung der Motorleistung bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor steht seit jeher im Fokus der Motorenentwickler.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Motorleistung zu steigern. Beispielsweise durch größeren Hubraum, Erhöhung der Zylinderanzahl, höhere Drehzahl oder erhöhte Kraftstoffverbrennung. Alle diese Maßnahmen haben aber unerwünschte Begleiterscheinungen wie Kosten, Mehrverbrauch, Gewicht, Verschleiß, oder höhere Luftzufuhr und somit höhere Saugarbeit zur Folge. Die Lösung: Durch Vorverdichten der Ansaugluft (z.B. mittels eines Turboladers) wird dem Motor die Saugarbeit abgenommen.

**„Wenn die Arbeit der Vorverdichtung aus der Nutzung der Restenergie in den Abgasen bewirkt wird, spricht man von Aufladung.“**

(Quelle: Motair GmbH, <http://www.motair.de/index.php?id=167>)

Bereits Ende der 1980er Jahre bewirkte die Verschärfung des Schadstoffemissionsgesetzes, dass heute nahezu jeder Nutzfahrzeugmotor aufgeladen wird und auch PKW mit Turbolader erlangen seitdem große Verbreitung. Mit Hilfe eines Turboladers wird der Wirkungsgrad des Dieselmotors erhöht und die Fahrleistungswerte von Ottomotoren annähernd erreicht. Die durch die Aufladung im Verdichter stark erwärmte Ansaugluft wird im sog. Ladeluftkühler wieder abgekühlt, bevor sie in den Brennraum gelangt.

Kalte Luft enthält wesentlich mehr Sauerstoffmoleküle als warme, und eine Kühlung der Ladeluft führt daher zu einem höheren Sauerstoffangebot im Brennraum. Das Ergebnis sind eine höhere Motorleistung und ein besseres Drehmoment sowie ein verringerter Kraftstoffverbrauch und niedrigere Abgasemissionen.

Der Ladeluftkühler ist ein Wärme-Tauscher, der in allen aufgeladenen Fahrzeugen eingebaut wird und üblicherweise zwischen Turbolader und Drosselklappe angeordnet ist. Die Bauteile, die im Ladeluftsystem für den Transport der Luft zuständig sind, werden als Ladeluftstrecke bezeichnet.

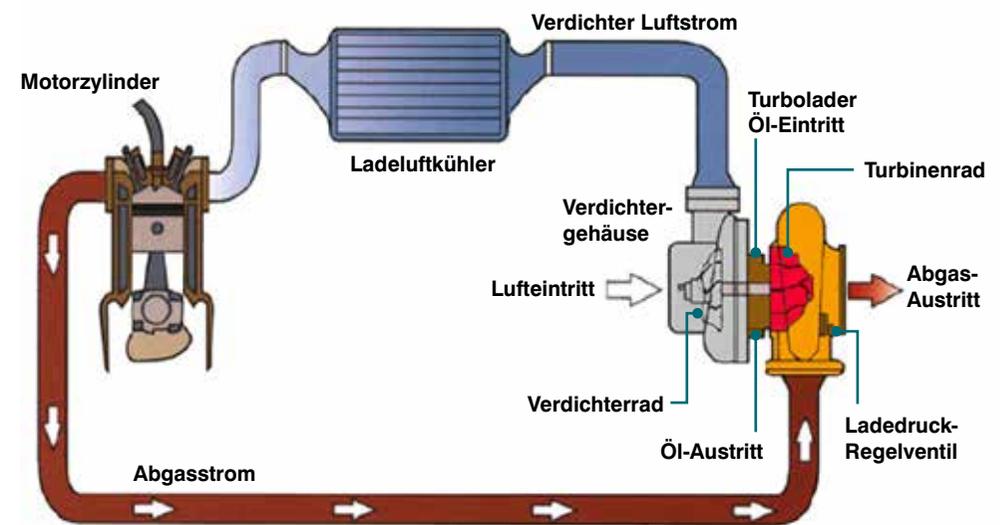
Die Aufladung von Verbrennungsmotoren wird heute nicht mehr primär unter dem Aspekt der Leistungssteigerung gesehen. Auch die Möglichkeit den Kraftstoffverbrauch bei gleicher Leistung zu senken, gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die Vorteile der Aufladung haben zusammen mit der fortschreitenden Entwicklung der Werkstoffe sowie durch neue Fertigungsmethoden zu einem stetig wachsenden Einsatz der Turboaufladung geführt.

(Quelle Absatz: Hochschule Ostwestfalen-Lippe, <http://www.hs-owl.de/fb6/labore/stroemungsmaschinen/diplom-sm/abgasturbo/geschichte/print.html>)

## Funktionen einer typischen Ladeluftstrecke

- Medium kühlen
- Medienbeständigkeit von innen und außen gewährleisten
- Dynamisch entkoppeln
- Montage und Anbindung sicherstellen
- Druck- und Temperaturbeständigkeit gewährleisten
- Craschanforderungen erfüllen
- Durchflusswiderstand gering halten
- Bewegungs- und Toleranzausgleich ermöglichen
- Geräuschentwicklung gering halten
- Permeation minimal halten
- Designanforderung erfüllen
- Applikation von Messgeräten ermöglichen

## Luftführung eines aufgeladenen Verbrennungsmotors



(Quelle: PowerLine, [http://www.turbolader.de/info\\_pages.php?pages\\_id=5](http://www.turbolader.de/info_pages.php?pages_id=5))

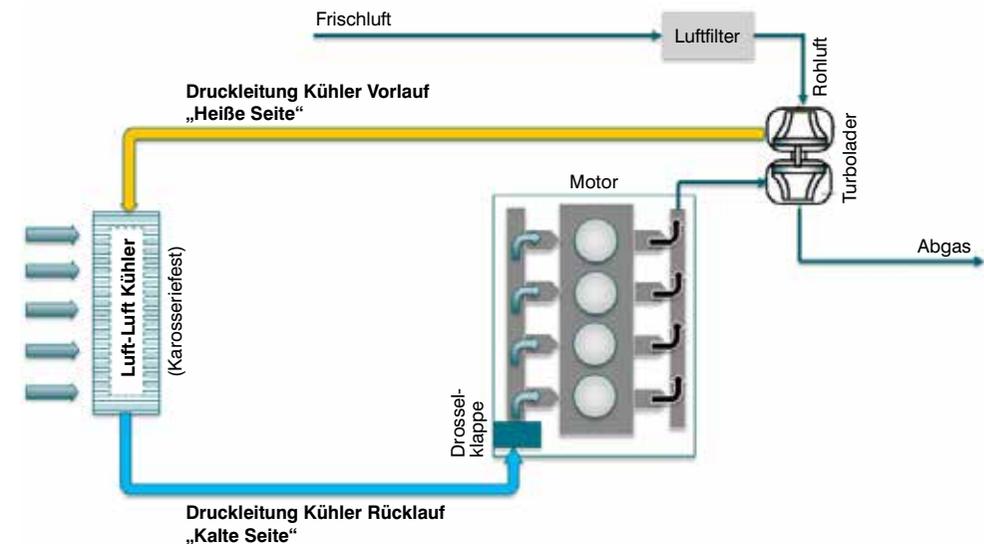
## 2. Beschreibung verschiedener Systeme

Die Kühlung der heißen Ladeluft kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Es haben sich dabei drei Systeme etabliert, wobei sich je nach gewähltem System unterschiedliche Ausführungsarten der Ladeluftstrecke ergeben:

- **Direkte Ladeluftkühlung:** Luft-Luft
- **Indirekte Ladeluftkühlung:** Luft-Wasser
- **Indirekte saugrohrintegrierte Ladeluftkühlung:** Luft-Wasser

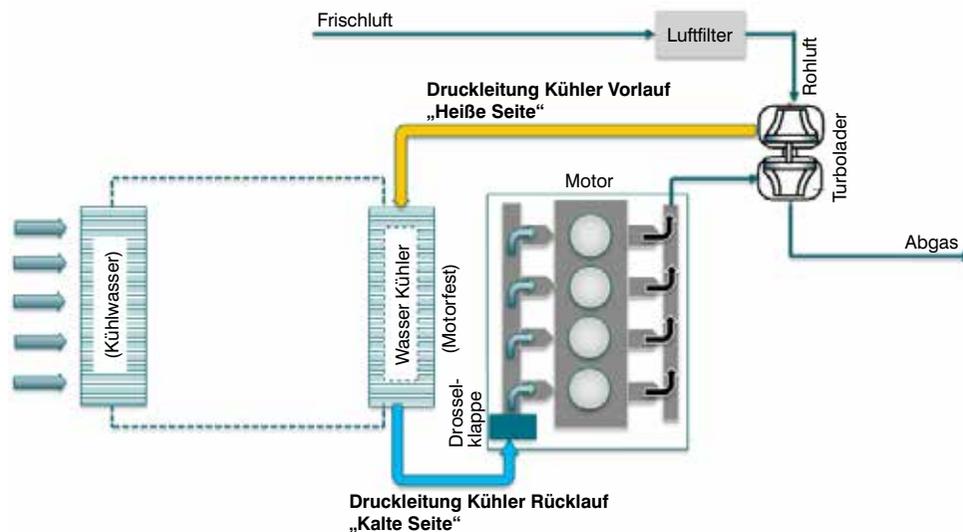
### Direkte Ladeluftkühlung: Luft-Luft-Kühler

Die Kühlung erfolgt hierbei über einen mit Luft durchströmten Kühler. Dieser wird typischerweise im Frontend platziert. Die Ladeluftleitungen müssen das Medium über entsprechend lange Strecken transportieren. Da der Kühler karosseriefest ist muss die Ladeluftführung einen entsprechenden Bewegungsausgleich ermöglichen.



## Indirekte Ladeluftkühlung: Luft-Wasser-Kühler

Die Kühlung erfolgt hierbei über einen mit Wasser durchströmten Kühler. Die Ladeluftleitungen transportieren das Medium über kurze Strecken. Da der Kühler typischerweise motorfest platziert ist, muss die Ladeluftführung lediglich die Einbautoleranzen und eine Schwingungskompensation ermöglichen. Der Bewegungsausgleich zwischen Karosserie und Motor, wie er bei Luft-Luft-Kühlsystemen üblicherweise erforderlich ist, entfällt. Ein weiterer Vorteil eines solchen Systems ist die generelle Steuerbarkeit der Ladeluftkühlung über den Wasserkühler, die bei einem direkten System nicht möglich ist.



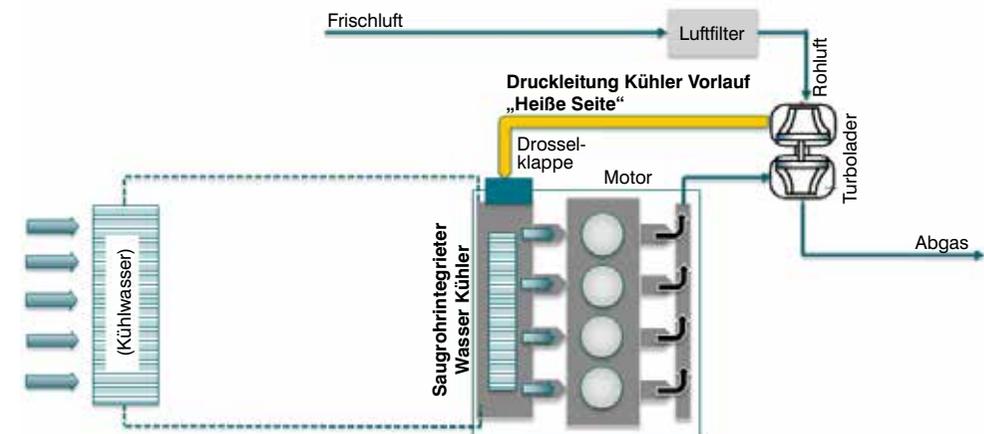
## Indirekte saugrohrintegrierte Ladeluftkühlung: Integrierter Luft-Wasser-Kühler

Die Kühlung erfolgt hierbei über einen mit Wasser durchströmten saugrohrintegrierten Kühler. Dieser ist dabei motorfest im Saugrohr integriert. Die Ladeluftleitungen transportieren das Medium über kurze Strecken. Eine Rücklaufleitung entfällt hierbei.

### Vergleich zur (direkten) Ladeluftkühlung

Im Vergleich zur (direkten) Ladeluftkühlung ergeben sich durch die indirekte Ladeluftkühlung folgende Effekte:

- + deutlich reduzierter Ladeluft-Druckabfall aufgrund kürzerer Strecken
- + verbesserte Motordynamik durch ein geringeres Ladeluftvolumen
- + erhöhte dynamische Kühlleistung
- + verbesserter Motorwirkungsgrad durch die Steigerung der Ladeluftdichte
- erhöhter Kühlaufwand durch ein zusätzliches Wasserkühlsystem



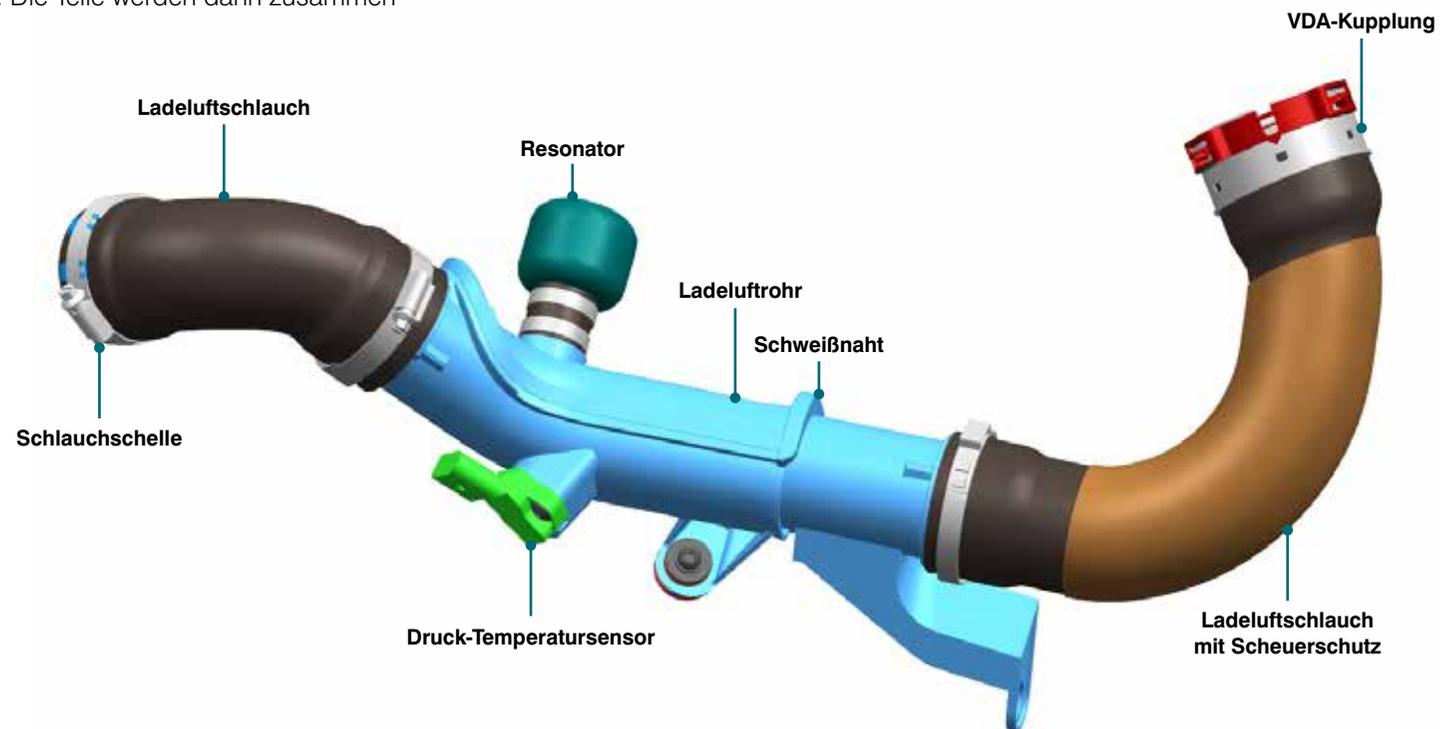
### 3. Eine typische Ladeluftstrecke

Das Bild zeigt exemplarisch eine Ladeluftstrecke mit möglichen Anbauteilen und entspricht beispielhaft einer Ladeluftstrecke mit einem zweigeteilten Ladeluftrohr und zwei angebundenen Druckschläuchen.

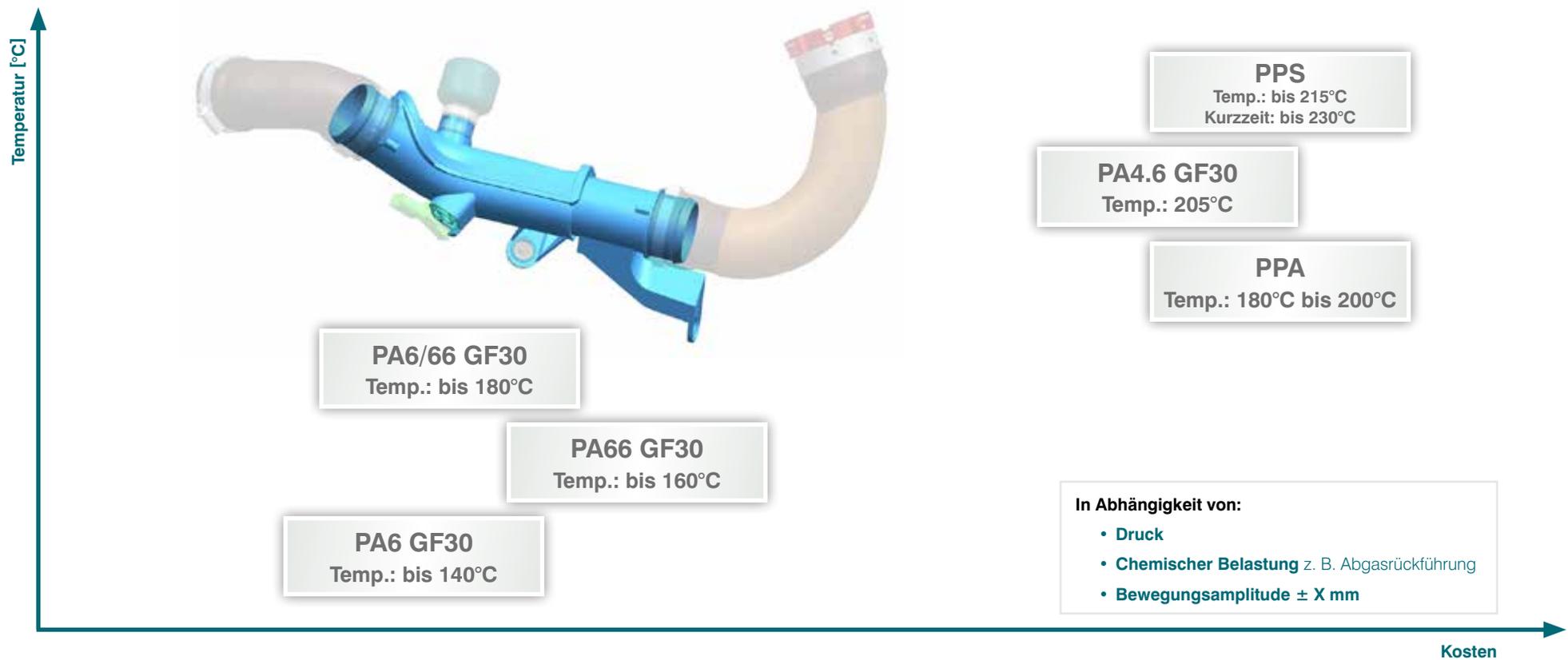
Das Kunststoffrohr wird typischerweise als Spritzgussteil oder als Blasformteil hergestellt. Bei der Spritzgussvariante ist es oft aus herstelltechnischen Gründen notwendig, das Kunststoffrohr mehrteilig auszuführen. Die Teile werden dann zusammengeschweißt.

Diese Schweißverfahren können sein:

- Infrarotschweißen
- Vibrationsschweißen
- Heißgasschweißen
- Heizelementschweißen

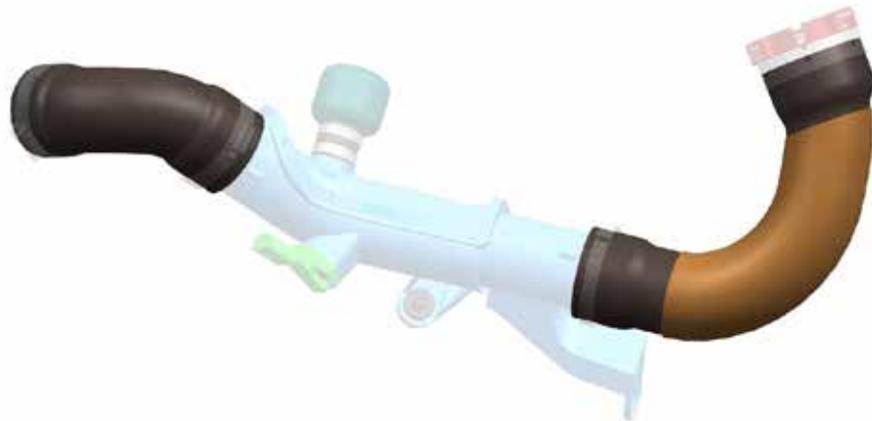


## Anforderungen an Materialien (Veritas-Lösungen) Portfolio Kunststoffe



# Anforderungen an Materialien (Veritas-Lösungen) Portfolio Elastomer

Temperatur [°C]



CM LT		CR LT
Schichtfolge:	CM DT CM	CR DT CR
Dauer Temp.:	120°C	110°C
Kurzzeit Temp.:	135°C	125°C

DT = Druckträger

AEM Classic	
Schichtfolge:	AEM p-AR AEM
Dauer Temp.:	160°C
Kurzzeit Temp.:	180°C

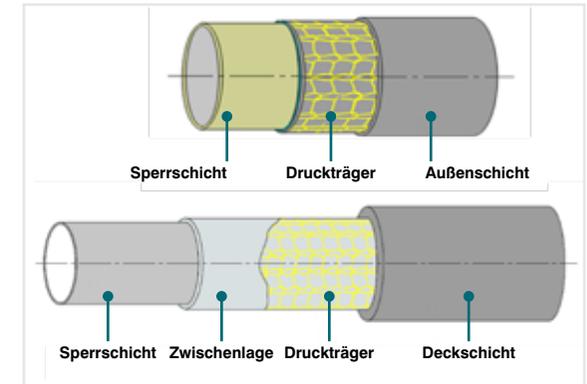
ACM Alternative	
Schichtfolge:	ACM p-AR ACM
Dauer Temp.:	150°C
Kurzzeit Temp.:	170°C

ECO Classic	
Schichtfolge:	ECO p-AR ECO
Dauer Temp.:	125°C
Kurzzeit Temp.:	150°C

HT ACM 185	
Schichtfolge:	ACM POD / m-AR ACM
Dauer Temp.:	185°C
Kurzzeit Temp.:	200°C

HT / HP	
Schichtfolge:	FKM nach DIN ISO 1629 GEN 7 MVQ m-AR MVQ
Dauer Temp.:	230°C
Kurzzeit Temp.:	250°C

HT / HP	
Schichtfolge:	FKM nach DIN ISO 1629 MVQ POD/m-AR MVQ
Dauer Temp.:	200°C
Kurzzeit Temp.:	230°C



Kosten

## Innovative Anbindungstechniken (Veritas-Lösungen)

Design: Veritas AG



Die Entwicklungsstufen der Veritas-Anbindungen entsprechen den steigenden Ladeluftdrücken aus der Leistungssteigerung der Motoren. Veritas bietet speziell mit der Kupplung „Vecoflan®“ inklusive dem zugehörigen Schlauchanschluss eine Verbindungstechnik an, die für Drücke bis 4,5 bar und Temperaturen bis 250°C konzeptioniert ist. Gleichzeitig wird die Leitungsmontage durch einfaches seitliches Einschleiben wesentlich erleichtert. Gesichert wird der Einschub durch eine Sekundärverriegelung.



Auswahl typischer Ladeluftleitungen, die Veritas in Serie liefert.



## 4. Emissionsgesetzgebung PKW

Seit einigen Jahren gibt es im Wesentlichen vier Gesetzgebungen, die in allen Schwellen- und Industriestaaten in verschiedenen Ausprägungen zur Anwendung kommen.

**CARB**-Gesetzgebung > Kalifornien, ähnliche Grenzwerte gelten in New York, Massachusetts, Connecticut, Vermont, Rhode Island, Maine, New Jersey

**EPA**-Gesetzgebung > restliche USA

**EU**-Gesetzgebung

**Japan**-Gesetzgebung

Die folgende Tabelle zeigt die bindenden Gesetze und deren Inkrafttreten weltweit.

Tab. 1: Emissionsgesetzgebung

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Europa	Tschechien	Euro 5				Euro 6		
	Frankreich	Euro 5				Euro 6		
	Deutschland	Euro 5				Euro 6		
	Ungarn	Euro 5				Euro 6		
	Italien	Euro 5				Euro 6		
	Polen	Euro 5				Euro 6		
	Russland		Euro 4				Euro 5	
	Slowakei	Euro 5				Euro 6		
	Türkei		Euro 5				Euro 6	
	Großbritannien	Euro 5				Euro 6		
China	Peking				Euro 5			
	China	Euro 4				Euro 5		
	Taiwan				Euro 5			
Japan / Korea	Japan				Japan '09			
	Süd Korea	Euro 5				Euro 6		
Mittlerer Osten / Afrika	Iran					Euro 2		
	Südafrika					Euro 4		
Nordamerika	Kanada		Tier II, Bin 4				Tier II, Bin 2	
	Mexiko - Benzin	Euro 4				Euro 5		
	USA		Tier II, Bin 4				Tier II, Bin 2	
	USA-Kalifornien					LEV III		
Südamerika	Argentinien					Euro 5		
	Brasilien - LCV Diesel			Euro 5			Euro 6	
	Brasilien - Otto			Euro 5			Euro 6	
Südasien	Australien					Euro 4		
	Indien - Hauptstadtregion					Euro 4		
	Indien - Rest					Euro 3		
	Indonesien					Euro 4		
	Malaysien					Euro 3		
	Thailand					Euro 4		

## ND-AGR (Niederdruck-Abgasrückführung)

Zur Erreichung der Emissionsgrenzwerte werden die Technologien weiterentwickelt. Eine wichtige Technologie ist die Abgasrückführung (AGR oder engl. ERG, Exhaust Gas Recirculation genannt).

Das Prinzip bewirkt durch Zuführen von Abgas in den Brennraum die Reduzierung von Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ). Das Abgas wird bei ND-AGR in den Ansaugraum zurückgeführt, indem ein Teil der angesaugten Frischluft über ein Rohr zugemischt wird.

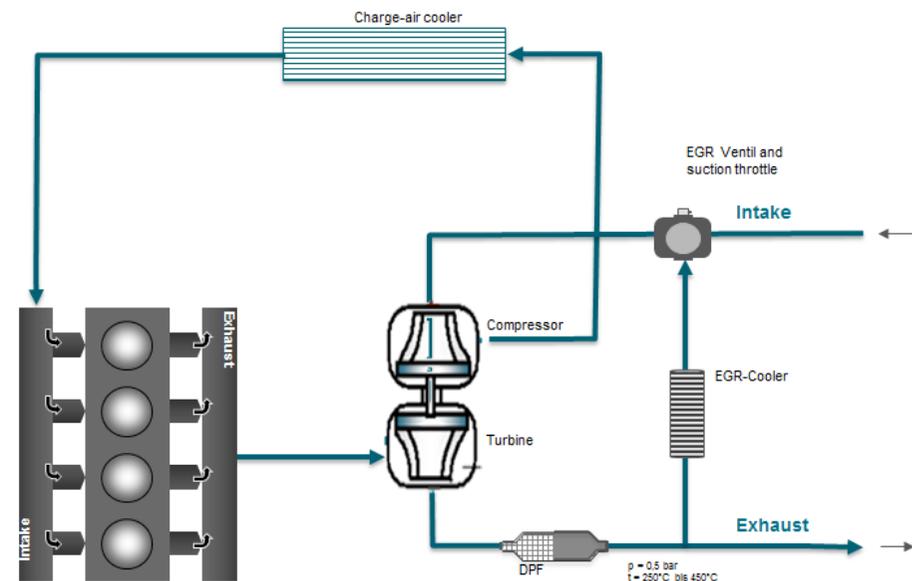
Bei Dieselmotoren ist sie eine der wichtigsten Maßnahmen zur Senkung der Stickstoffemission. Je nach Kraftstoffzusammensetzung und Fahrprofilen überwiegen organische oder aggressive Säuren im Kondensat.

Diese Technologie stellt allerdings verschärfte Anforderungen an Werkstoff und Materialbeständigkeit der Ladeluftführungen. Je nach Konzentration ist das Medium stark säurehaltig bis zu einem pH-Wert kleiner 1 und kann bei falscher Werkstoffauswahl die Ladeluftleitungen, die aus Kunststoff, Elastomerschläuchen und Dichtkomponenten bestehen, direkt schädigen. Dies kann somit zum Ausfall des Systems führen.

Veritas hat hierzu die entsprechenden Lösungen für Ladeluftführungen, die den Forderungen nach hoher Materialverträglichkeit auf Lebensdauer gegenüber der säurehaltigen Ladeluft entsprechen.

Die Zusammensetzung von ND-AGR-Kondensat variiert stets und ist abhängig von

- Motorperformance und Motormanagement
- Fahrstil (Geschwindigkeit, Drehzahl, Kaltstarts,...)
- Ausführung des Kühlsystems
- Zusammensetzung des Kraftstoffs (S,  $\text{H}_2\text{O}$ , RME,...)



AGR: Eine komplexe, variable und aggressive Mischung (mit pH-Wert bis zu  $< 1$ )

## 5. Simulation und Prüfungen

### Aktuelle und zukünftige Anforderungen

Das Resultat höherer Ladeluftdrücke sind höhere Temperaturen. Mit Veritas-Silikonschläuchen sind Temperaturen bis zu 250°C realisierbar. Da Silikonschläuche vergleichsweise teuer sind, wird versucht, über neuartige Kunststoffmaterialien einen Großteil der Ladeluftstrecke abzubilden. Gleichzeitig müssen die Materialien eine höhere Beständigkeit insbesondere gegen aggressive Medien, wie dem bereits erwähnten AGR-Kondensat, aufweisen.

Um all diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist weiterhin Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig.

Aus steigenden Anforderungen erwachsen neue und umfangreichere Prüfungen. In Folge dessen steigen auch die Umfänge und Kosten der Prüfanforderungen an OEM und Systemlieferant. Der Trend geht hier zur vollständigen Verlagerung der Prüfungen hin zum Systemlieferant.

Der Systemlieferant zeichnet sich aus durch umfangreiche Kenntnisse über Werkstoffe, Bauteilauslegung, Simulation und hohem Systemverständnis.

Um hiervon einen Eindruck zu erhalten, sind auf den folgenden Seiten einige Werkzeuge zur Systemauslegung, Simulation und Prüfung genannt, sowie das für Ladeluftstrecken erforderliche umfangreiche Prüfequipment von Veritas AG.

### Simulation und Prüfungen

von der ersten Designstufe bis zum Serienprodukt



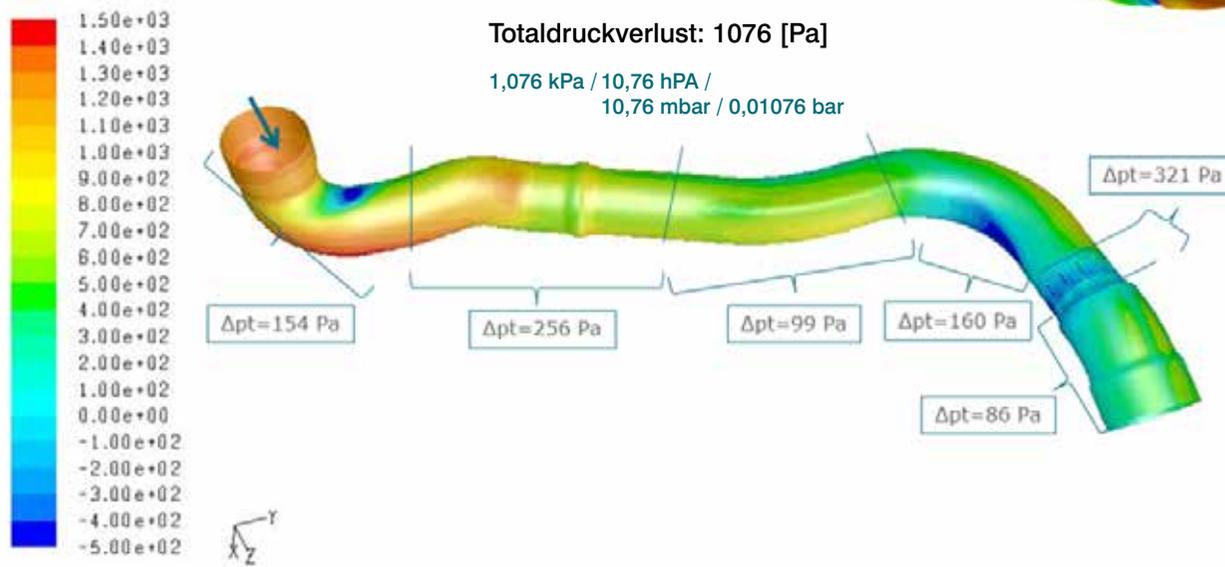


## Numerische Strömungsmechanik

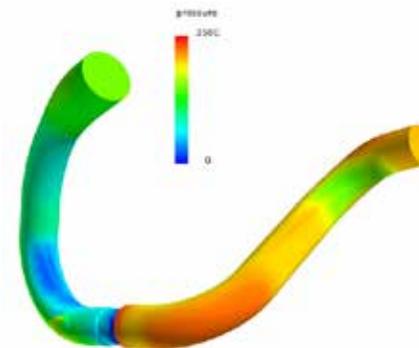
Computergestützte Strömungsberechnung CFD - Computational Fluid Dynamics

Beispielhaft hier die Druckverlustberechnung einer Ladeluftleitung.

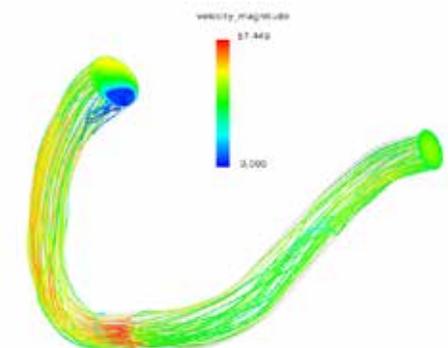
Durch die Anordnung des Leitungsverlaufes, die Bauraum bedingt nur geringfügig beeinflusst werden kann, sind Druckverluste nicht zu vermeiden. Deshalb ist es wichtig, die Druckverluste bereits während des laufenden Entwicklungsprojektes zu erkennen und weitgehend zu eliminieren.



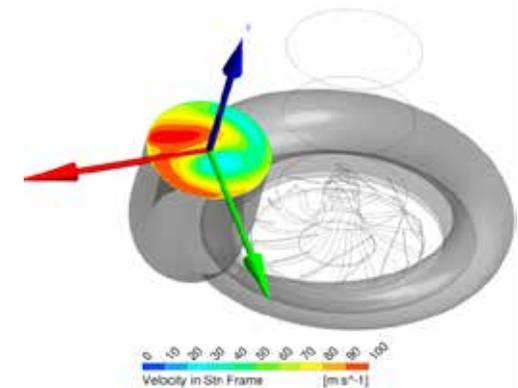
Statischer Druck an Rohrwand



Stromlinienfäden Geschwindigkeitsverteilung



Drallbehaftete Einströmung

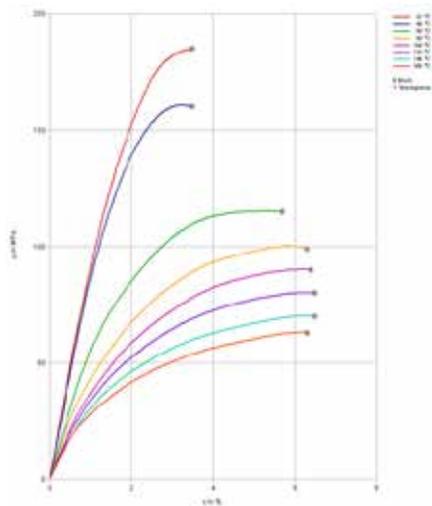


## Numerische Strukturberechnung

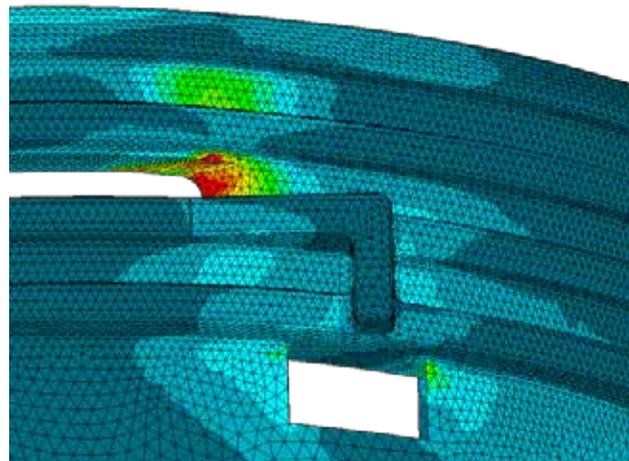
Computergestütztes numerisches Berechnungsverfahren FEM – Finite Elemente Methode

Beispielhaft hier die Festigkeitsberechnung einer Schnellkupplung.

Die Verbindungsteile von Ladeluftführungen unterliegen besonderen pulsierenden Bauteilbelastungen durch Druck- und Temperatureinfluss. Mit Hilfe der Berechnung zur mechanischen Belastung können komplexe Werkstoffverhalten und nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge dargestellt und als Ergebnis die Bauteile optimiert werden.



Strukturberechnung



Bauteilversagen im Bereich einer Klammerhalterung



## Prüfungen

In der Entwicklungsphase sind umfangreiche Prüfungen des Ladeluftsystems durchzuführen, um die Funktion aller Komponenten über den gesamten Lebenszyklus sicherzustellen. Die Prüfungen repräsentieren den Lebenszyklus in zeitlich extrem geraffter Form. Die Vorgaben resultieren aus Kundenforderungen (Werknormen und Lastenhefte). Es werden Belastungen in Form von Temperaturwechsel, Druckänderung und dreidimensionaler Bewegung meist kombiniert miteinander aufgebracht.

### Übersicht Prüfmöglichkeiten Veritas AG



#### Impulsprüfstand mit Temperierung von Medium und Kammer mit Rotations- und Staucheinheit

4 Großprüfstände für bithermale Ladeluftprüfung, 3 davon mit mehraxialer Bewegungseinrichtung und/oder Schwingungsanregung, Umgebungstemperatur von -40 °C bis 220 °C, Mediumtemperatur von Rt bis 300 °C, Druckbereich bis 4 bar



#### Impulsprüfstand mit Kammertemperierung

13 Prüfstände für unithermale Ladeluftprüfung, Temperaturbereich von Rt bis 300 °C, Druckbereich bis 15 bar



#### Impulsprüfstand mit Bewegungseinrichtung bei RT

Druckbereich von 0,1 bar bis 15 bar, Prüfmedium Luft, Bewegung: Weg  $\pm$  50 mm, Kraft bis 5 kN, Frequenz bis 200 Hz



#### Berstdruckprüfstand

Druckbereich bis 1.000 bar, Prüfmedium Wasser



#### Temperaturwechselprüfstand mit Schwingeinrichtung

Temperatureinheit mit elektrodynamischem Shaker, Kammervolumen 1.000 Liter, Kammertemperatur von -70 °C bis 180 °C, Druckbereich bis 15 bar, Schwingamplitude  $\pm$  25,6 mm, Frequenz von 5 Hz bis 3.000 Hz, Beschleunigung max. 60 g



#### CT-Prüfstand

Computertomograph zur Vermessung von Teilen und zur zerstörungsfreien Untersuchung von Bauteilen

#### Salzsprühnebelkammer für Korrosionsprüfung

Kammervolumen 1.000 l, Medium NaCl-Lösung, relative Luftfeuchte von 10 % bis 95 %, Kammertemperatur von Rt bis 60 °C, Mediumtemperatur von Rt bis 75 °C

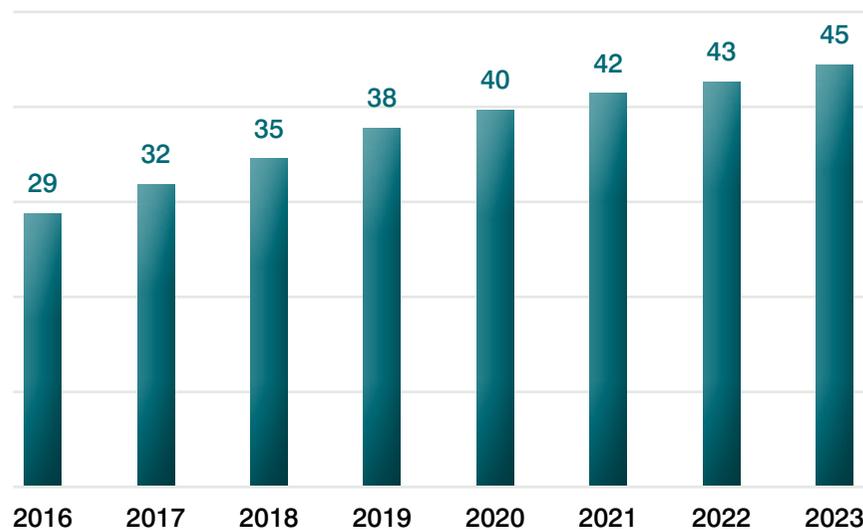
#### Akustikmessungen

## 6. Ausblick

Der Anteil von aufgeladenen Motoren steigt weltweit und verdrängt weiterhin die Saugmotoren. So werden bis 2023 nahezu 55 % aller Motoren aufgeladen sein. Der Markt für Ladeluftführungen bleibt also weiterhin interessant.

(Quelle: IHS)

Aufgeladene Motoren in Mio. Stück weltweit bis 2023

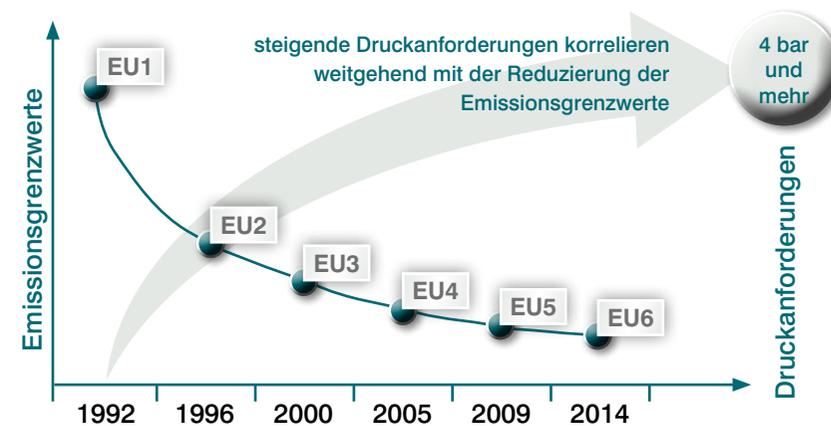


Immer niedrigere Werte bei den Emissionsvorgaben für die Fahrzeuge erfordern immer höhere Anforderungen an Druck, Temperatur und Materialbeständigkeit. Downsizing/Rightsizing führen zu kleineren bzw. optimierten Hubräumen. Die Leistungssteigerung erfolgt über höhere Ladedrücke und damit einhergehende höhere Temperaturen.

Dieser Entwicklungsprozess ist kontinuierlich, und eine physikalische Grenze ist derzeit nicht absehbar. Ladeluftdrücke bis 4 bar sind bei PKW bereits in Entwicklung.

Emissionsgrenzwerte nur erreichbar über Aufladungssysteme

- höhere Drücke
- höhere Temperaturen
- Downsizing / Rightsizing



**Veritas AG**  
Stettiner Straße 1-9  
D-63571 Gelnhausen  
Tel +49 (0) 6051.821-0  
Fax +49 (0) 6051.821-1900  
veritas@veritas.ag  
www.veritas.ag