

Fachwissen/Motorentchnik
Die Turboaufladung

Die Motoraufladung wurde seit dem Ende des 19. Jahrhunderts in Erwägung gezogen und seit 1922 in Renn- und Sportfahrzeugen verwendet. Sein Prinzip beruht auf der Hinzufügung eines Kompressors, der die Ansaugluft verdichtet und die Verbrennung von mehr Kraftstoff im vorhandenen Motor ermöglicht, um die Leistung zu erhöhen. Wird der Luftverdichter von der Kurbelwelle des Motors angetrieben, absorbiert er einen bedeutenden Teil Leistung die er erzeugt. Ein Turbolader hingegen ist nichts anderes als ein dynamischer Verdichter (Kreisellverdichter) der nicht von der Kurbelwelle sondern von einer Abgasturbine angetrieben wird, die über eine gemeinsame starre Welle miteinander verbunden sind und dadurch mit derselben Geschwindigkeit und in derselben Richtung drehen. Die Energie in den Abgasen, die ansonsten verloren ginge, wird von der Turbine genutzt, um den Kompressor anzutreiben (**Bild 1**).

Bild Ford

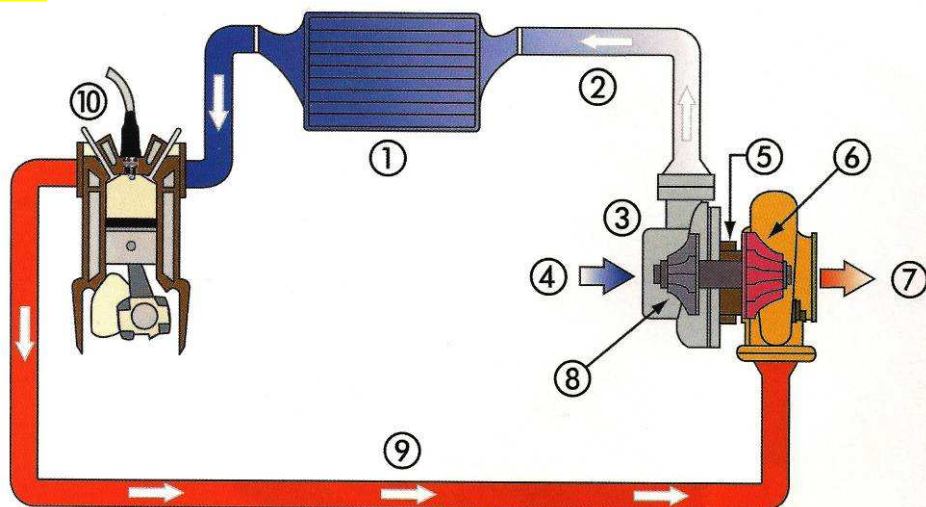


Bild 1 Aufbau eines Verbrennungsmotors mit Abgasturbolader. 1= Ladeluftkühler; 2= Verdichtete Ansaugluft; 3= Verdichtergehäuse; 4= Lufteintritt; 5= Lagerung Turbinenwelle; 6= Turbinenrad; 7= Abgasaustritt; 8= Verdichterrad; 9= Abgasstrom; 10= Motorzylinder.

In früheren Jahren waren die zwangsbeatmeten Motoren mittels Turbolader wenig alltagstauglich. Im unteren Drehzahlbereich ging es meist nur zäh voran, bis der Turbo sein prinzipbedingtes Loch überwunden hatte, genug Ladedruck aufbauen konnte und dann vehement für Vortrieb sorgte. Die Nachteile früherer Jahre sind heute größtenteils überwunden und der Durchbruch der Abgasturboaufladung im Pkw gelang mit der Einführung der ersten aufgeladenen Dieselmotoren im Mercedes Benz 300 SD im Jahre 1978 und 1981 im VW Golf Turbodiesel. Mit Hilfe des Turboladers konnten der Wirkungsgrad des Pkw-Dieselmotors erhöht und die Fahrleistungswerte des Ottomotors annähernd erreicht werden. Zugleich wurden die Schadstoffemissionen verringert.

Generell gibt es mehrere Wege, einem Motor durch Aufladung zu mehr Luft, mehr Füllung und dadurch mehr Kraft zu verhelfen. Kompressoren wie der Rootsbläser (bei Mercedes) werden nur noch selten verwendet. Der Comprexbläser (zuletzt bei Mazda) ist von der Bildfläche verschwunden, und auch der G-Bläser (VW) und Flügelzellenverdichter spielen heute keine Rolle mehr. Die weitaus meisten Luftverdichter basieren heute auf dem Prinzip der Turboaufladung (**Bild 2**).



Bild 2 War die Leistungssteigerung früher das Hauptargument für den Turbolader, so sind es heute in erster Linie Energieersparnis, verringerte Emissionen und somit auch der Umweltschutz.

Vor- und Nachteile

Die Vorteile der Abgasturboaufladung gegenüber herkömmlichen Saugmotoren sind:

- Deutlich besseres Leistungsgewicht.
- Ein Turbomotor ist kleiner als ein gleich starker Sauger,
- dadurch ein hohes Potenzial für „Downsizing“, also kleinere, aber gleich starke Motoren.
- Der Drehmomentverlauf kann durch spezielle Turbos verbessert werden.
- Aufgeladene Motoren haben in größerer Höhe kaum Leistungsabfall.
- Weniger Verbrauch und geringere Emissionen bei kleineren, aber gleich starken Turbomotoren.

Dem gegenüber stehen aber auch Nachteile in Zusammenhang mit der Abgasturboaufladung:

- Drehmoment bei niedriger Drehzahl und Motorbremse schwach, wegen eines begrenzten Hubraums im Vergleich zu denen eines Saugmotors von gleicher Leistung.
- Beim Beschleunigen aus niedrigen Drehzahlen fehlte vor allem bei älteren Turbomotoren die richtige Abgasmenge, um den gewünschten Ladedruck zu erzeugen (Turboloch).
- Das Verdichtungsverhältnis bei Ottomotoren muss verringert werden um innerhalb annehmbarer Verdichtungs- und Verbrennungsdrücke zu bleiben (Klopffahr).
- Bei Ottomotoren muss das Kraftstoff-Luftgemisch bei Vollast (Lambda zwischen 0,75 und 0,85) übermäßig angefettet werden, weil ein Teil des Kraftstoffes zur inneren Kühlung des Motors verwendet werden muss, da die Abgasturbinen rot glühend heiß werden können, um so die Abgastemperatur zu senken. Die neuesten Ausführungen verkraften Temperaturen bis 1.050 °C, aber ihre Produktionskosten sind sehr hoch.
- Durch den Einsatz eines Turboladers erhöht sich der Bauteilaufwand, vor allem im Bereich der Ladeluftkühlung und Schmierung und eventueller Kühlung des Turboladers.
- Erhebliche Regelungstechnik rund um den Turbolader ist notwendig, die auch die Störanfälligkeit steigert. Die Schadensdiagnose kann sich durch den Einsatz von Turboladern erheblich komplizieren.

Allgemeines

Das Prinzip der Abgasturboaufladung ist einfach. Ein Turbo ist nichts anderes als eine Luftpumpe, die mehr Luft in die Verbrennungsräume befördert, als der Motor es durch konventionelle Saugarbeit selbst bewerkstelligen kann.

Da die Leistung eines Hubkolbenmotors mit innerer Verbrennung von der Luftmasse die er pro Zeiteinheit ansaugen kann abhängt, kann sein mittlerer Verbrennungsdruck – und folglich dadurch sein Drehmoment und seine Leistung – in sehr großem Maßstab durch das zuführen von komprimierter Luft erhöht werden. Sein Verdichtungsverhältnis, das heißt das Verhältnis der im Zylinder vorhandenen Volumen zum Kolben im unteren (UT) und oberen Totpunkt (OT) muss jedoch in dem Maße verringert werden, dass der Verdichtungs- und der Verbrennungsdruck die zulässigen Grenzwerte nicht überschreiten. Für Benzinmotoren ist eine Begrenzung des Verdichtungsdrucks notwendig um das Phänomen der Selbstentzündung des Kraftstoff-Luftgemisches zu vermeiden wo hingegen bei Dieselmotoren der Verbrennungsdruck durch den mechanischen Widerstand der Motorstrukturen begrenzt ist.

Heute halten die neuesten Turbolader am Eingang der Turbine Temperaturen die 1050°C erreichen können aus, was die Notwendigkeit zusätzlicher Kraftstoffeinspritzung bei Vollast (Mehrverbrauch) zur Kühlung durch Verdunstung überflüssig macht. In Verbindung mit der Benzindirekteinspritzung und der Einlassnockenwellenverstellung, kann auch die Turboaufladung bei Benzinmotoren optimal genutzt werden.

Aufbau und Funktionsweise

Seit der Erfindung des Turboladers im Jahre 1905 durch den Schweizer Alfred Büchi haben sich die Grundfunktionen eines Abgasturboladers nicht mehr wesentlich geändert. Ein Abgasturbolader besteht aus einem Verdichter und einer Turbine, die durch eine gemeinsame Welle miteinander verbunden sind (**Bild 3**). Die heißen Motorabgase werden über den Auslasskrümmer direkt auf das Turbinenrad des Turbos geleitet und treiben es zu extrem hohen Drehzahlen bis zu 300.000 Umdrehungen pro Minute an (bei Dieselmotoren deutlich weniger). Beispielsweise erreicht ein kleiner Turbolader wie der des PSA/Ford HDI/TDCi 1,4 Dieselmotors Drehzahlen bis zu 240 000 1/min ($240.000 \text{ 1/min} : 60 = 4.000 \text{ Umdrehungen pro Sekunde}$). Die Turbine liefert somit die Antriebsenergie für das Verdichterrad, das Frischluft ansaugt, komprimiert und sie an die Brennräume weiterleitet. Aufgrund der thermischen Belastung durch die hohen Abgastemperaturen ist das Turbinengehäuse in der Regel aus Grauguss und das Verdichtergehäuse aus Leichtmetall ausgeführt.

Bild BMW



Bild 3 Bei einem Turbolader sitzen Turbine (links) und Verdichterrad (rechts) auf einer Welle. Für den Antrieb sorgt die Energie im Abgas.

Die Verdichter der meisten Turbolader sind Radialverdichter. Durch die Drehzahl des Verdichterrades aus Aluminiumdruckguss wird Luft axial angesaugt und im Rad auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt. Die verdichtete Luft verlässt das Verdichterrad in radialer Richtung und wird mit entsprechendem Druck dem Motor zugeführt. Dem Motor wird also die Saugarbeit abgenommen. Mit der erhöhten Kraftstoffmenge für die vorverdichtete Luft kann der Motor eine höhere Leistung abgeben. Die Turbine eines Turboladers besteht in der Regel aus dem Turbinenrad (hochwertige Eisen-Nickel-Legierung) und dem Turbinengehäuse. Die Turbine setzt die Energie aus den Motorabgasen in mechanische Energie zum Antrieb des Verdichters um. Der sich verengende Querschnitt des Turbinengehäuses sorgt dafür, dass die thermische Energie der Abgase in kinetische Energie umgewandelt wird, die das Turbinenrad antreibt. Man unterscheidet zwischen Axial- und Radialturbinen. In Pkw- sowie in Nutzfahrzeug- und Industriemotoren sind fast ausschließlich Radialturbinen zu finden.

Ein Turbo muss möglichst präzise auf die Eckwerte des Motors abgestimmt sein, also auf Hubraum, Leistung und Drehzahl. Die anvisierte Turboleistung wird erreicht über die Kombination aus Verdichter- und Turbinenradgröße, Laufgeschwindigkeit und Gehäusegröße. Diese Parameter bestimmen die Luftmenge, die der Turbo liefern kann.

Hinweis: Hingegen der weitverbreiteten Meinung, schaltet sich der Turbolader nicht Ein und Aus. Er dreht bereits wenn der Motor im Leerlauf läuft. Der Ladedruck baut sich kontinuierlich und progressiv, mit der Erhöhung der Last und der Drehzahl auf.

Stau- und Stoßdruckaufladung

Es gibt verschiedene Turbinenausführungen: Turbinen, die mit konstantem Druck arbeiten (Staudruckaufladung) und solche, die mit Stosswellen arbeiten (Stoßdruckaufladung). Anwendung finden beide Ausführungen, manchmal in etwas modifizierter Form. Welche Art gewählt wird, hängt vom Motortyp, der Anzahl der Zylinder, dem jeweiligen Anwendungsgebiet und verschiedenen anderen Faktoren ab.

Bei der Staudruckaufladung werden die Abgase aller Zylinder in einem gemeinsamen Auspuffkrümmer zusammengeführt und erst danach unter fast konstantem Druck zum Turbolader geleitet. Dadurch werden die durch das Ausschleiben bedingten Druckpulsationen der einzelnen Zylinder in einem einzigen Abgassammelbehälter geglättet. Die Turbine kann dadurch im Bereich hoher Motordrehzahlen bei geringem Druck mehr Abgas durchsetzen. Da der Motor gegen einen geringeren Abgasgedruck ausschleiben kann, verbessert sich der Kraftstoffverbrauch des Motors in diesem Betriebsbereich.

Um bei kleinen Motordrehzahlen ein großes Motordrehmoment zu bekommen bedient man sich der Impuls- oder Stoßdruckaufladung. Es handelt sich um ein „fächerförmiges“ Auspuffsystem, bei dem die Abgase der verschiedenen Zylinder in getrennten Leitungen zum Turbolader geleitet werden, um so ihre kinetische Energie nutzen zu können (Bild 13).

Schmierung und Kühlung

Die Schmierung und Kühlung des Turboladers erfolgt über den Schmierölkreislauf des Motors. Das Lager- oder Mittelgehäuse bildet die Verbindung zwischen Turbine und Verdichter. Die Turbinenwelle dreht sich im Mittelgehäuse. Das Schmieröl strömt mit ca. 4 bar in den Turbolader. Der Öl Ablauf erfolgt nahezu drucklos in das Kurbelgehäuse. Für Ottomotoren, bei denen die Abgastemperatur um 200 bis 300 °C höher liegt als bei Dieselmotoren, werden meist wassergekühlte Lagergehäuse eingesetzt (**Bild 4**).

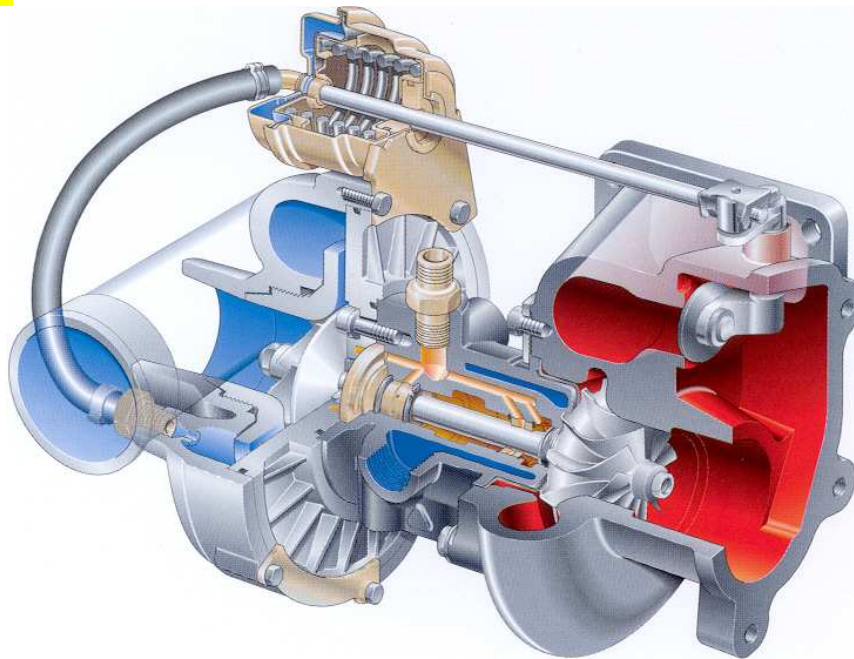


Bild 4 Auf der Abgasseite (rechts) herrschen Temperaturen bis zu 1000 °C. Auf der Frischluftseite (links) sind es dagegen nur rund 180 °C. Der Lader für Ottomotoren ist zwar ähnlich aufgebaut wie ein Lader für Dieselmotoren, hat aber einen zusätzlichen Wasserkühlmantel um die Läuferwelle samt Lagern.

Um zu verhindern, dass das Motoröl in das Verdichter- bzw. Turbinengehäuse eindringt, muss das Lagergehäuse nach beiden Seiten abgedichtet werden. Hierzu werden bei der dynamischen Abdichtung Kolbenringe verwendet. Diese Kolbenringe tragen zwar dazu bei, Ölleckagen zu verhindern, garantieren aber keine absolute Abdichtung. Eigentlich müsste man sie als eine Art Labyrinthdichtung bezeichnen, durch die der Gas- und Luftstrom von der Turbine bzw. vom Verdichter zum Lagergehäuse und umgekehrt erschwert wird. Wenn ein Turbolader normal arbeitet, sind die Drücke in der Turbine und im Verdichter höher als im Lagergehäuse und dies führt im Betrieb zu einer weiteren Ölabdichtung des Lagergehäuses. Eine andere Möglichkeit, das Lagergehäuse abzudichten, ist die Anbringung eines Gleitringes auf einem Gaspolster, der die Läuferwelle zum Lagergehäuse abdichtet.

Hinweis: Wird der Ölrücklauf behindert, kommt es zu einem Ölrückstau in der Lagerung. Das Motoröl strömt dann durch die Dichtringe in den Verdichter und in die Turbine.

Lagerung

Die enorm hohen Drehzahlen der Turbolader können nur erreicht werden durch eine gute Wellenlagerung. Anfangs und auch heute noch besteht diese aus hydrodynamischen Gleitlagern, d.h. durch Ölschlüsse und entsprechendem Öldruck fängt die Welle an zu schwimmen und wird geschmiert. Die Lagerung ist so aufgebaut, dass sich zwischen dem stehenden Lagergehäuse und der drehenden Welle eine mit etwa halber Wellendrehzahl mitrotierende Schwimmbuchse aus Messing befindet (Zweibuchsenlagerung). Dadurch ist es möglich, die Lagerung dieser schnell drehenden Wellen so abzustimmen, dass es in keinem Betriebspunkt zu einer Festkörperberührung zwischen Welle und Lagerung kommt. Heute wird jedoch oft die Einbuchsenlagerung verwendet, ermöglicht sie doch einen geringeren Lagerabstand wodurch die Turbolader kleiner und kompakter gebaut werden können. Hier dreht sich die Welle innerhalb der im Lagergehäuse feststehenden Gleitlagerbuchse (**Bild 5**). Neuere Fertigungstechniken ermöglichen den Einsatz einer kugelgelagerten Welle, welche deutlich robuster und haltbarer sind, sie jedoch bis heute nicht durchsetzen konnten. Dabei gibt es ein oder zwei Keramiklager zusätzlich zur Gleitlagerung. Kugelgelagerte Turbolader haben eine geringere Gleitreibfläche, was sie schneller ansprechen lässt. Dadurch erfolgen ein schnellerer Drehzahlanstieg des Turboladers und ein früher einsetzender Ladedruck, sie sind aber wiederum nicht für die heutigen hohen Drehzahlen geeignet. Zudem sind die Herstellungskosten in der Produktion sehr hoch.



Bild 5 Ein Turbolader kann Drehzahlen bis zu 300.000 1/min erreichen. Diese enorm hohen Drehzahlen können nur erreicht werden, weil die Turboladerwelle in einem hydrodynamischen Gleitlager gelagert ist.

Ladeluftkühlung

Die Verdichtung der Ansaugluft führt zu einer Temperaturerhöhung der Ansaugluft, die bei Serienmotoren dadurch bis zu 180 °C erwärmt wird. Neben der zusätzlichen Temperaturbelastung des Motors verringert sich dadurch auch die erreichbare Leistung, da sich der Füllungsgrad des Motors verschlechtert. Der Grund dafür ist die geringere Dichte der heißen Luft, wodurch dem Motor eine geringere Sauerstoffmenge zugeführt wird. Um das zu vermeiden, wird die Ladeluft bei praktisch allen modernen aufgeladenen Motoren durch Ladeluftkühler gekühlt. Die Ladeluftkühler verwenden Kühlflüssigkeit oder Luft zur Kühlung (**Bild 6 + 7**). Es sind auch zweistufige Ladeluftkühler im Einsatz, die gleichzeitig Kühlflüssigkeit und Luft als Kühlmedium verwenden. Die Ladeluft strömt dabei zum Beispiel durch einen Rippenkühler und gibt einen Teil ihrer Temperatur an die Umgebung ab. Die Oberfläche des Ladeluftkühlers wird bei Luft-Ladekühler vom Fahrtwind umströmt und abgekühlt. Da der Ladeluftkühler dem Strom der Ladeluft einen gewissen Widerstand entgegensetzt und so den Ladedruck etwas vermindert, sollte die Temperaturdifferenz der Ladeluftkühlung größer als ca. 50 Grad sein, um eine wirksame Leistungssteigerung zu erzielen. Die Ladeluftkühlung bringt zusammengefasst folgende Vorteile:

- Eine weitere Leistungssteigerung aufgeladener Motoren bei konstantem Druckverhältnis (Verdichterleistung) entsprechend der höheren Ladungsdichte.
- Eine abgesenkte NO_x-Emission infolge niedrigerer Verbrennungstemperaturen durch die kältere Luft.
- Eine entscheidende Verbesserung im Klopfverhalten aufgeladener Ottomotoren. Erst mit Ladeluftkühlung sind Ottomotoren im Kraftstoffverbrauch akzeptabel.

Hinweis: Manche Fahrzeughersteller boten frühere Dieselmotoren mit oder ohne Ladeluftkühler an, wodurch es große Leistungsunterscheide gab

Bild Audi



Bild 6 Eine Ladeluftkühlung macht einen aufgeladenen Motor wirklich effektiv.

Bild VW

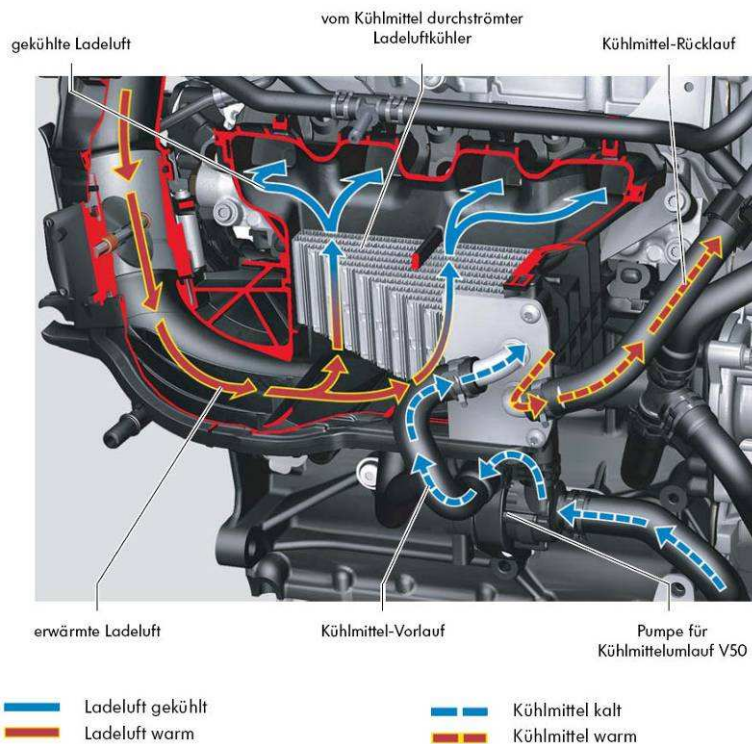


Bild 7 Beim 1,4I-90KW-TSI-Motor kommt eine flüssigkeitsgekühlte Ladeluftkühlung zum Einsatz. Dazu ist im Saugrohr ein vom Kühlmittel durchströmter Ladeluftkühler verbaut.

Ladedruckregelung

Die Steuerung von Ladedruck und Ansprechverhalten geschieht immer turbinenseitig. Die folgenden Arten kommen zum Einsatz:

- Mechanisch-pneumatische Ladedruckregelung über ein Bypassventil.
- Verstellbare Turbinengeometrie.
- Elektronische Ladedruckregelung über Stellmotor.

Hinweis: Die Ladedrücke eines aufgeladenen Motors dürfen die vom Hersteller festgelegten Ladedrücke nicht überschreiten, da es sonst zur Zerstörung des Motors kommen kann.

Bypassventil (Wastegate)

Die kostengünstigste Art der Ladedruckregelung ist die Steuerung durch ein Bypassventil. Bei ihr wird ein Teil der Motorabgase bei Bedarf um die Turbine herumgeführt (Bypass). Der Ladequerschnitt wird in diesem Fall so ausgelegt, dass die Turbine bereits bei geringen Motordrehzahlen ordentlich Druck aufbaut. Dadurch kann das berüchtigte Turboloch etwas entschärft werden. Als Regelorgan dienen entweder ein Tellerventil oder eine platzsparende Klappe. Beide werden pneumatisch betätigt. Der nötige Steuerdruck wird auf der Druckseite hinterm Verdichterrad abgenommen.

Das Bypassventil begrenzt die Leistung des Abgasturboladers, d.h., der Abgasturbolader kann bei öffnen des Klappenventils nur einen bestimmten Ladedruck erreichen. Das Klappenventil besteht aus einer Ventilklappe im Turbinengehäuse und einem außen liegenden Antriebsgestänge mit einer Membrandose. Sie ist bei kleiner Bauform sehr robust gegen hohe Umgebungstemperaturen und starke Vibrationen (**Bild 8**).

Bild Ford



Bild 8 Schnittbild eines Turboladers mit einem Bypassventil.

Die Membrandose wurde früher vom Ladedruck aus dem Verdichtergehäuse direkt beaufschlagt und öffnet bei einem eingestellten Wert die Ventilklappe über die Druckstange. Wenn das Klappenventil öffnet wird ein Teil des Abgases nicht mehr über die Turbine, sondern direkt in das Auspuffrohr geleitet. Mit dieser Funktion wird ein weiterer Anstieg des Ladedrucks verhindert (**Bild 9**).

Bild Ford

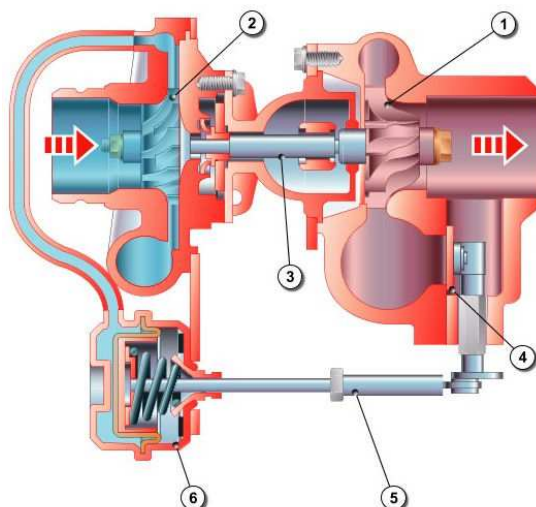


Bild 9 Ladedruckregelung mit Wastegate. Erreicht der Ladedruck einen bestimmten Wert, wird die Membrandose das Klappenventil betätigen. 1 = Turbinenrad; 2 = Verdichterrad; 3 = Verbindungswelle; 4 = Klappenventil; 5 = Druckstange; 6 = Membrandose.

Bei heutigen pneumatischen betätigten Druckdosen wird der benötigte Druck aus einem Druckspeicher zum Erreichen einer vorgegebenen Position durch ein Magnetventil (Drei-Wege-Ventil) eingestellt. Dieses Magnetventil wird mit einer vom Motorsteuergerät pulsweitenmoduliertem (PWM) Steuerspannung versorgt (**Bild 10**).

Hinweis: Bei Dieselmotoren kann die Ladedruckregelung auch mit Unterdruck erfolgen.

Bild Ford abgeändert

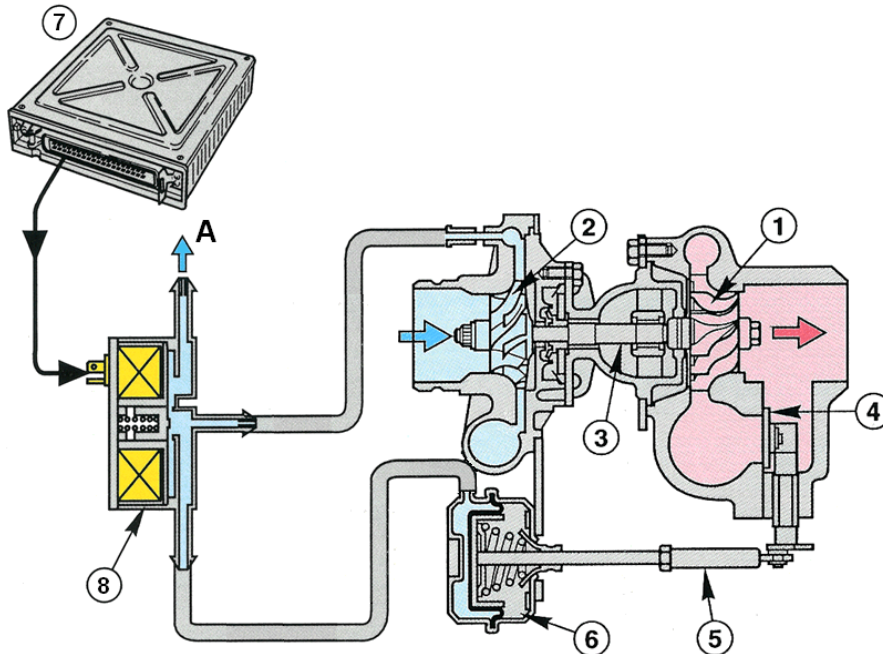


Bild 10 Abgasturbolader mit Bypass (Wastegate) mit elektronischer Ladedruckregelung durch das Motorsteuergerät. A = Leckluft; 1 = Turbinenrad; 2 = Verdichterrad; 3 = Verbindungswelle; 4 = Klappenventil; 5 = Druckstange; 6 = Membrandose; 7 = Motorsteuergerät; 8 = Magnetregelventil.

Gegenüber der rein pneumatischen Regelung, die nur als eine Begrenzung des Vollastdruckes wirken kann, wird durch eine flexible Ladedruckregelung auch die Einstellung des optimalen Ladedruckes bei Teillast ermöglicht. Der Ladedruck kann dabei in Abhängigkeit einer Vielzahl von Parametern wie z. B. der Ladelufttemperatur, des Zündwinkels bzw. der Einspritzparameter und der Kraftstoffqualität optimal eingestellt werden. Auch hat das Motorsteuergerät die Möglichkeit je nach Lastanforderung den Ladedruck über die Normalwerte hinaus anzuheben (Overboost-Funktion). Die dadurch resultierende Drehmomentanhebung ist vorübergehend und variabel geschaltet.

Regelung mittels verstellbarer Turbinengeometrie

Die verstellbaren Leitringe im Turbinengehäuse von VTG-Turboladern ermöglichen es, den Strömungsquerschnitt der Turbine den Betriebszuständen des Motors anzupassen. Der Gesamtwirkungsgrad von Turbolader und Motor wird erheblich verbessert. VTG-Lader erlauben den Verzicht auf das Ladedruckregelventil, weil der Anströmwinkel des Abgasstroms auf die Turbine über die Leitschaufeln pausenlos verändert werden kann, mit den entsprechenden Folgen für Ladedruck.

Elektronische Ladedruckregelung über Stellmotor

Die elektronische Ladedruckregelung durch einen elektrischen Stellmotor verfügt über einen deutlich erweiterten Verstellbereich, wodurch der Ladedruck noch genauer über den gesamten Drehzahlbereich auf einen gewünschten, im Kennfeld gespeicherten Wert geregelt wird (**Bild 11**). Besonders im unteren Drehzahlbereich ist es wichtig, einen schnellen Ladedruckanstieg zu erzielen. Das drückt sich direkt im Drehmoment und damit in den Durchzugsvermögen des Motors und im reduzierten Schadstoffausstoß aus.

Bild Ford



Bild 11 Elektrisch angesteuerter VGT-Lader von Garrett.

Umluftventil

Bei aufgeladenen Ottomotoren ist die Drosselklappe, mit der die Motorlast vorgegeben wird, hinter dem Verdichter im Luftansaugrohr angebracht. Bei einer plötzlichen Gaswegnahme würde sich die Drosselklappe schließen und der Verdichter infolge seiner Massenträgheit Luft gegen ein nahezu geschlossenes Volumen fördern, wodurch ein Staudruck im Verdichtergehäuse entsteht. Durch diesen Staudruck wird das Verdichterrad stark abgebremst und der Verdichter würde anfangen zu pumpen. Die Drehzahl des Turboladers würde sehr schnell abnehmen und würde im Fahrbetrieb ein „Turboloch“ verursachen.

Um das zu verhindern, wird ein Umluftventil durch einen elektrischen Stellmotor oder durch ein Unterdruck betätigtes Ventil geöffnet. Es öffnet einen Umgehungskanal, um die bereits verdichtete Luft über das Verdichterrad wieder zur Saugseite des Verdichterkreislaufs zu leiten. Somit bleibt die Turbine auf Drehzahl und bei einem anschließenden Beschleunigungsvorgang steht sofort wieder Ladedruck zur Verfügung (**Bild 12**).

Bild VW

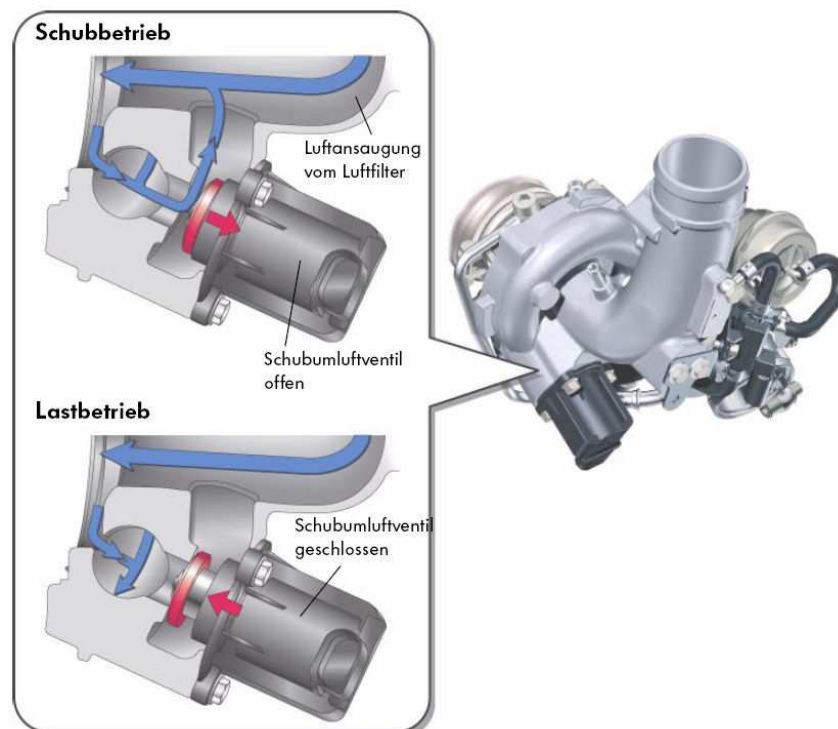


Bild 12 Direkt am Turbolader angeflanscht ist das Schubluftventil. Es sorgt dafür, dass der Lader im Schiebepetrieb nicht zu viel Drehzahl verliert.

Zweiflutige Turbine (Twin Scroll)

Bessere Ausnutzung der Abgasenergie und optimiertes Motoransprechverhalten bei niedrigen Drehzahlen verspricht die zweiflutige Turbine (**Bild 13**). Hier werden die Abgase von jeweils zwei Zylindern beim Vierzylindermotor (jeweils drei Zylinder beim Sechszylindermotor) durch separate Kanäle auf die Turbine geleitet (Stoßdruckaufladung). Dadurch soll vermieden werden, dass die Verbrennungsgase, die von dem Zylinderpaar ausgestoßen werden, das andere Paar beeinflussen, das genau in dem Moment neue Frischgase einatmet, also beim Ladungswechsel. Zudem wird der Abgasgegendruck, der auf das Turbinenrad wirkt, durch den Zweifluter gleichmäßiger, das Pulsieren der ausgestoßenen Abgase reduziert sich. Dadurch verbessern sich Wirkungsgrad und Ladedruckverlauf und somit auch die Drehmomententfaltung und der Kraftstoffverbrauch des Motors.

Bild Renault

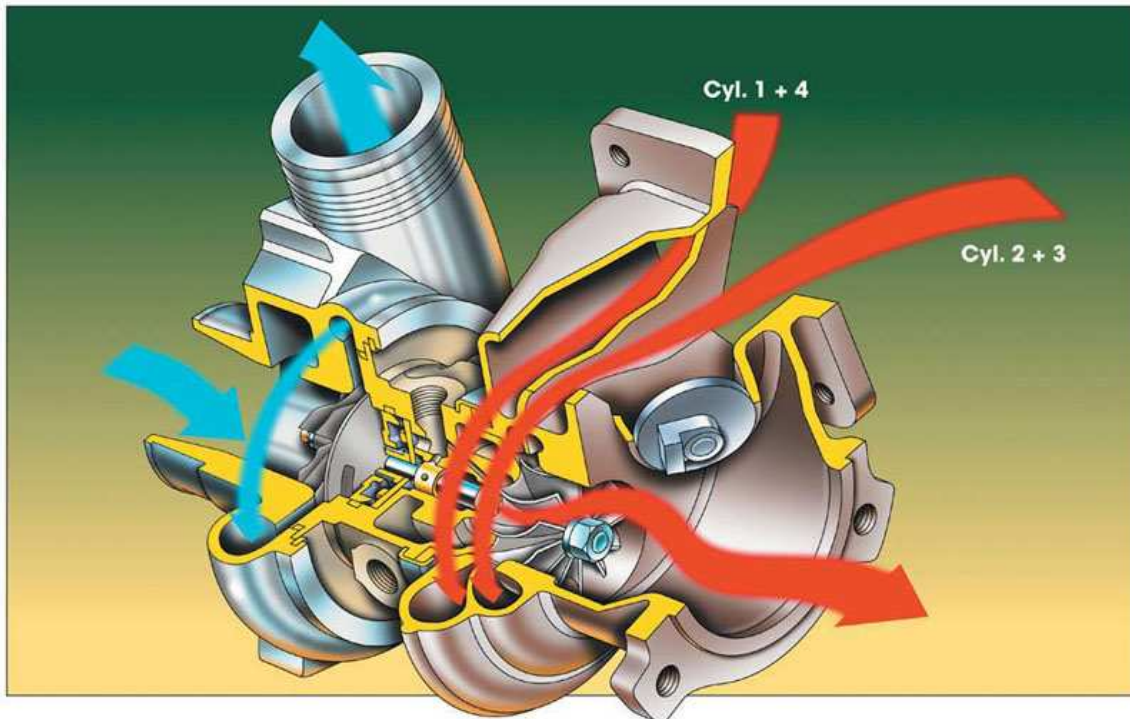


Bild 13 Bei der zweiflutigen Turbine (Twin Scroll) sollen getrennte Abgaseinlasskanäle für jeweils zwei Zylinder unerwünschte Interferenzen zwischen einzelnen Zylindern vermeiden.

VTG-Lader (Variable Turbinen Geometrie)

Die bisher dargestellten Ladedruckregelverfahren regeln die Turbinenleistung, indem ein Teil der Abgasmenge um die Turbine herum geleitet wird. Die verstellbare Turbinengeometrie (andere Bezeichnung VNT = **V**ariable **N**ozzle **T**urbine) ermöglicht es, den Strömungsquerschnitt der Turbine in Abhängigkeit des Motorbetriebspunktes zu verstellen (**Bild 14**). Dadurch wird die gesamte Abgasenergie genutzt, und der Strömungsquerschnitt der Turbine kann für jeden Betriebspunkt optimal eingestellt werden, sodass gegenüber der Bypassregelung der Wirkungsgrad des Turboladers und damit der des Motors verbessert werden.

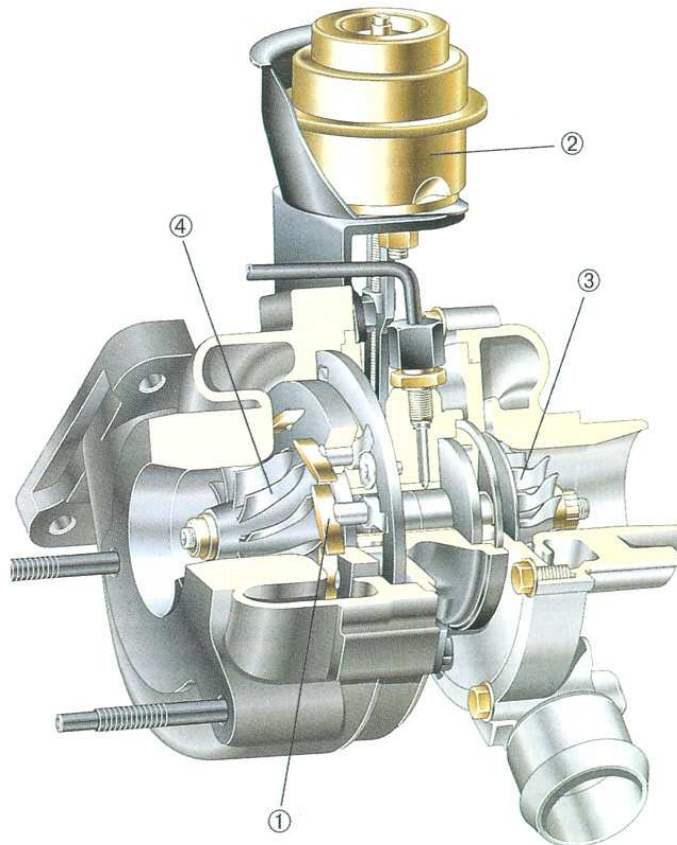


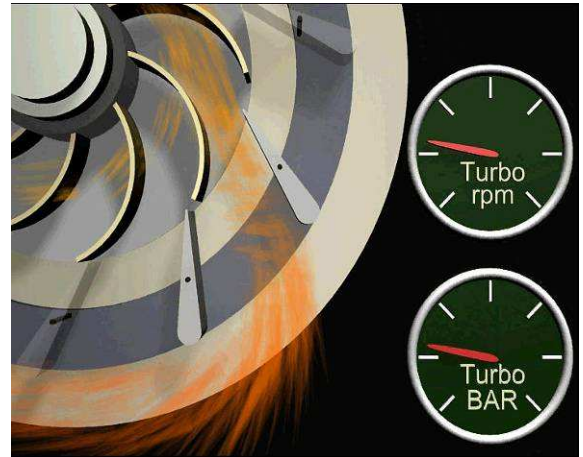
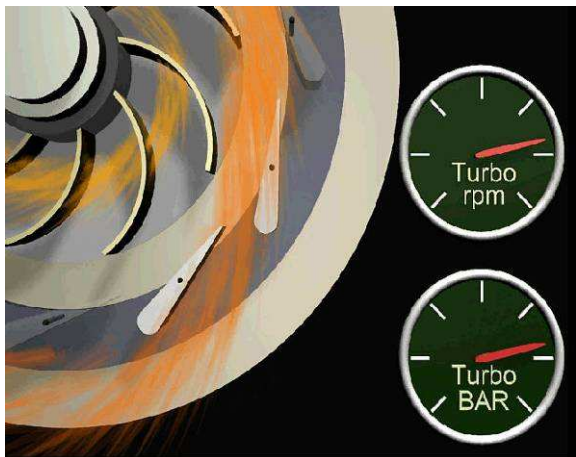
Bild 14 Sowohl im Nutzfahrzeug als auch im Pkw-Sektor werden seit den Neunziger verstärkt die so genannten VTG- (BorgWarner) oder VNT- (Garrett) Turbolader mit variabler Turbinengeometrie eingesetzt. Die Leitschaufeln werden mit einem Stelling über einen – in diesem Fall pneumatischen – Aktor bewegt. 1 = verstellbare Leitschaufel; 2 = Unterdruckdose; 3 = Verdichterrad; 4 = Turbinenrad.

Die verstellbare Turbinengeometrie mit drehbaren Leitschaufeln ist heute bei modernen Pkw-Dieselmotoren Stand der Technik. Sie sind zurzeit am besten in der Lage, die Drehmomentschwäche bei niedrigen Drehzahlen, die vor allem bei Vierventilern auftritt, teilweise auszubügeln. Die ständige Anpassung des Turbinenquerschnittes auf den Fahrzustand des Motors bewirkt eine Verminderung des Verbrauches und der Schadstoffemissionen und sorgt für ein nahezu optimales Drehmoment in allen Last- und Drehzahlbereichen des Motors.

Die drehbar gelagerten Leitschaufeln, welche um das Turbinenrad herum angeordnet sind, verändern das Aufstauverhalten und damit die Leistung der Turbine. Dabei kann der Durchsatzbereich der Turbine im Verhältnis von 1:3 bei gutem Wirkungsgrad variiert werden.

Bei niedrigen Motordrehzahlen wird der Einströmungsquerschnitt der Turbine durch schließen der Leitschaufeln enger. Die Verengung bewirkt eine hohe Geschwindigkeit des Abgasstroms. Gleichzeitig wirkt der Abgasstrom auf den Außenbereich der Turbinenschaufeln (großer Hebelarm). Der Ladedruck und damit das Drehmoment des Motors steigen (**Bild 15**).

Bei hohen Motordrehzahlen öffnen die Schaufeln und geben einen größeren Eintrittsquerschnitt frei, um die große Abgasmenge aufnehmen zu können. Der gewünschte Ladedruck wird bei einem niedrigen Turbinendruckverhältnis erreicht, der Kraftstoffverbrauch des Motors wird verringert. Während der Fahrzeugbeschleunigung aus niedrigen Drehzahlen werden die Leitschaufeln geschlossen, um die maximale Energie aus dem Abgas zu gewinnen. Mit zunehmender Drehzahl öffnen die Schaufeln und passen sich an den jeweiligen Betriebspunkt an (**Bild 16**).



Bilder 15 + 16 Bei einem VTG-Lader lässt sich über die Leitschaufeln der Turbinenquerschnitt verändern und somit der Ladedruck bei unterschiedlichen Drehzahlen anpassen. Das Bild links zeigt die Stellung der Leitschaufeln für hohes Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen. Im Bild rechts öffnet sich der Einlassquerschnitt vor der Turbine maximal, damit wird bei höheren Drehzahlen der benötigte Ladedruck erreicht aber nicht überschritten.

Die Ansteuerung der Leitschaufeln erfolgt heute meist über einen elektrischen Stellmotor mit Positionsrückmeldung, der erheblich schneller und präziser als mit der pneumatischen Betätigung arbeitet. Dies bringt Vorteile im Ansprechverhalten und bei den Abgasemissionen. Ab der Euro 4 Norm sind elektrische Stellmotoren in Verwendung.

Hinweis: Befindet sich das System im Notlauf, werden die Leitschaufeln so gesteuert, dass sie den größten Einströmungsquerschnitt freigeben, wodurch Ladedruck und Motorleistung sinken.

Die Abgastemperaturen betragen heute bei moderner Hochleistungs-Dieselmotoren bis zu 830 C. Damit die Leitschaufeln sich im heißen Abgasstrom exakt und zuverlässig bewegen können, werden hohe Anforderungen an die Werkstoffe gestellt. Ebenso ist eine sehr sorgfältige Abstimmung der Toleranzen innerhalb der Turbine notwendig. Durch das Ansammeln von Russpartikeln aus dem Abgas im Bereich des Stellrings und der Steuernocken, muss an den Lagerstellen und insbesondere an den Eingriffen der Steuernocken in den Stellringen ein ausreichendes Spiel vorhanden sein, damit die Leitschaufeln während der gesamten Lebensdauer des Fahrzeugs zuverlässig arbeiten.

VNTOP-Lader (Variable Turboaufladung mit Regelungskolben)

Garrett entwickelte nach dem VTG-Lader (Variable Nozzle Turbine) den VNTOP-Lader (Variable Nozzle Turbine One Piece). Bei diesem Turbolader handelt es sich um eine einfachere Ausführung des Turboladers mit variabler Turbinengeometrie (Bild 17).

Bild Honeywell-Garrett

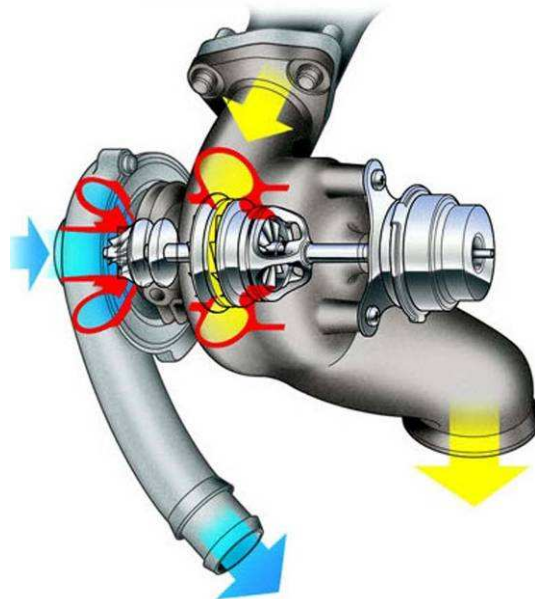
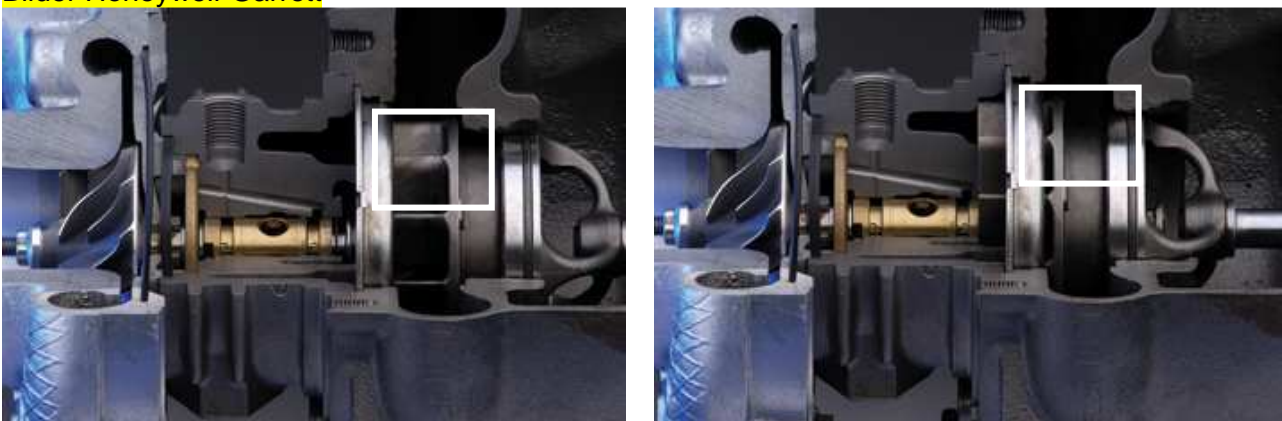


Bild 17 Variable Turboaufladung mit Regelungskolben von Honeywell-Garrett mit der Bezeichnung VNTOP 15, findet Verwendung bei PSA (Peugeot-Citroën).

Der Turbolader besitzt keine verstellbaren Leitschaufeln, sondern einen axial beweglichen Kolben, der den Einlassquerschnitt der Turbine im Verhältnis zur Achse des Turboladers einstellen kann (Bilder 18 + 19). Es handelt sich um einen kompakten, kostengünstigeren und einfacher aufgebauten Turbolader ohne aufwendige Einstellmöglichkeiten. Dieser Turbolader eignet sich besonders für kleine Dieselmotoren in der kleinen und mittleren Fahrzeugklasse.

Für die Verstellung des Einlassquerschnittes wird nur ein Aktuator benötigt. Die Verstellung erfolgt pneumatisch mittels einer Steuerdruckdose.

Bilder Honeywell-Garrett



Bilder 18 + 19 Im linken Bild befinden sich die Leitschaufeln in der offener Position es erfolgt maximaler Turbinenantrieb. Im rechten Bild befinden sich die Leitschaufeln in geschlossener Position es erfolgt nur eine begrenzter Turbinenantrieb.

Turbolader in doppelter Ausführung

Mehrere Fahrzeughersteller setzen vermehrt auf den Einsatz von mittlerweile zwei Turboladern. Dadurch wird noch mehr Ladedruck und damit mehr Leistung erzielt. Dies ermöglicht kleinere Motoren mit weniger Hubraum bei gleicher oder höherer Motorleistung (Downsizing) und damit geringeren Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen. Folgende Kombinationen von Turboladern sind möglich:

- Zweistufige Aufladung
- Doppelaufladung

Zweistufige Aufladung

Bei der zweistufigen Aufladung, auch als Registeraufladung oder Twin Turbo (Twin ist englisch und bedeutet „Zwilling“) bezeichnet, gibt es zwei Turbolader in Reihe, ein großer Niederdruckturbo und eine kleine Hochdruckturbine (**Bild 20**). Die verschiedenen Turbolader können optimal auf ihren Wirkungsbereich abgestimmt werden, und der kleine Hochdrucklader minimiert das so genannte Turboloch.

Bild BorgWarner



Bild 20 Zweistufen Turbolader von BorgWarner. Die zweistufige Aufladung erfüllt Anforderungen an Drehmoment, Ansprechverhalten und Leistung.

Der Hochdruck-Abgasturbolader ist auf den geringen Massenstrom bei niedrigen Drehzahlen ausgelegt und kann schon bei 1.000 1/min ordentlich Ladedruck aufbauen. Bei mittleren Drehzahlen arbeiten beide Stufen in Serie. Bei höheren Drehzahlen wird die Hochdruckturbine mittels Bypass umgangen, weil der Niederdrucklader allein für ausreichend Ladedruck sorgt. Im Vergleich zu herkömmlichen Turboladern baut sich der Ladedruck im unteren Drehzahlbereich viel schneller auf, was Auswirkungen auf einen hohen Drehmomentverlauf ab Leerlaufdrehzahl hat.

Eine kontinuierliche Regelung zwischen den beiden Stufen erfolgt durch abgas- und luftseitige Steuerklappen, die die Luft- und Abgasströme pneumatisch oder elektronisch steuern (**Bild 21**).

Vorteile dieser Konfiguration sind:

- Schnelles Ansprechen auf Drehzahl- und Lastwechsel.
- Schneller Ladedruckaufbau.
- Hoher Luftdurchsatz bei hohen Drehzahlen.

Bild Decoster

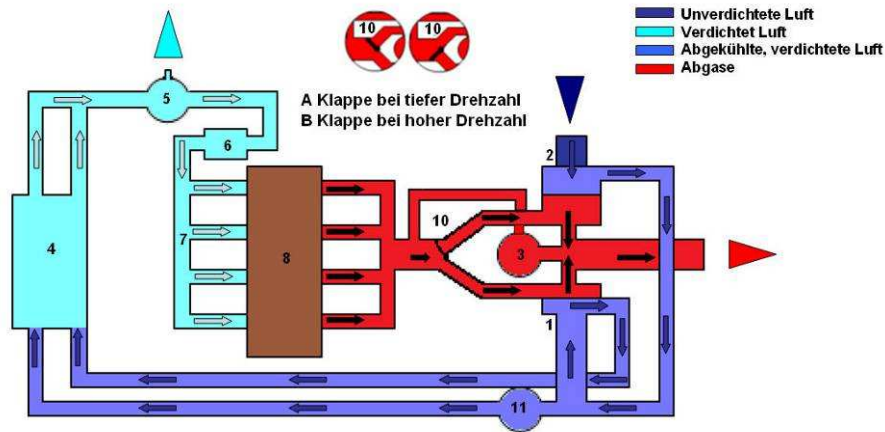


Bild 21 Schematische Darstellung der zweistufigen Aufladung. 1 = Lader für tiefe Drehzahlen; 2 = Lader für hohe Drehzahlen; 3 Externes Wastegate-Ventil; 4 = Ladeluftkühler; 5 = Umluftventil; 6 = Drosselklappe; 7 = Ansaugkrümmer; 8 = Motor; 9 = Auslasskollektor; 10 = Umschaltklappe; 11 = Umschaltventil.

Hinweis: Auch die Kombination von Abgasturbolader und mechanisch angetriebenem Kompressor ist möglich.

Doppelaufladung

Bei ihr erfolgt die Aufladung durch zwei gleich große parallel geschaltete Abgasturbolader, die auch als Bi-Turbo bezeichnet wird. Bi ist die lateinische Vorsilbe für zwei. Bei dieser Konstruktionsform werden anstelle eines einzelnen größeren zwei kleinere Abgasturbolader verwendet. So wird bei einem Vierzylinder-Biturbo-Motor jeder Turbolader von zwei Zylindern mit Abgas versorgt. Durch die Verwendung von zwei kleineren Turboladern mit entsprechend geringeren Trägheitsmomenten kann das Ansprechverhalten beim Gasgeben verbessert werden. Ebenso wird das Drehmoment im unteren Bereich gesteigert und mehr Leistung im oberen Bereich erzielt.

Sequentieller Bi-Turbo

Bei einem sequenziellen Bi-Turbo werden nicht beide Turbinen ständig durch das Abgas angetrieben, sondern die zweite Turbine wird erst bei entsprechendem Leistungsbedarf zugeschaltet und treibt dann den zweiten Verdichter an. Ist das geschehen, arbeiten die Lader nach dem Prinzip des Bi-Turbos parallel. Vorteil dieser Technik ist, dass in den niedrigen Lastbereichen das gesamte Abgas auf nur eine Turbine wirkt, was den Wirkungsgrad des Laders verbessert.

Der 2,2 l Dieselmotor von Ford/PSA (DW12BTE4) ist mit einem sequenziellen Bi-Turbo ausgerüstet, bei dem zwei Turbolader mit fester Turbinengeometrie von gleicher Größe parallel geschaltet sind (**Bild 22 + 23**). So werden 400 Nm ab 1.750 1/min erreicht und verhelfen so zu einer imposanten Drehmomentsreserve von 34%. Das Ziel ist nicht die Leistung zu steigern, sondern vielmehr den Einlassdruck bei niedriger Drehzahl zu erhöhen, um die schädlichen Abgasemissionen zu verringern und das maximale Drehmoment frühzeitiger zu erreichen. Tatsächlich kann die Ausführung mit einem einzigen Turbolader die gleiche Leistung (125 kW oder 170 PS) und das gleiche maximale Drehmoment erreichen, jedoch erst bei 2.000 1/min anstatt bei 1.750 1/min. Auch wird die Übergangsreaktion erheblich verbessert, einerseits weil die beiden kleinen Turboladern, drehende Bauteile mit geringer Massenträgheit haben und andererseits weil nur ein Turbolader unterhalb von 2.700 1/min in Betrieb ist. Oberhalb dieser Drehzahl werden die Abgase auf die beiden Turbolader verteilt.



Bild 22 Beim 2,2 L Vierzylinder (DW12) bei PSA sorgt die Doppelaufladung für günstigere Abgasemissionen.

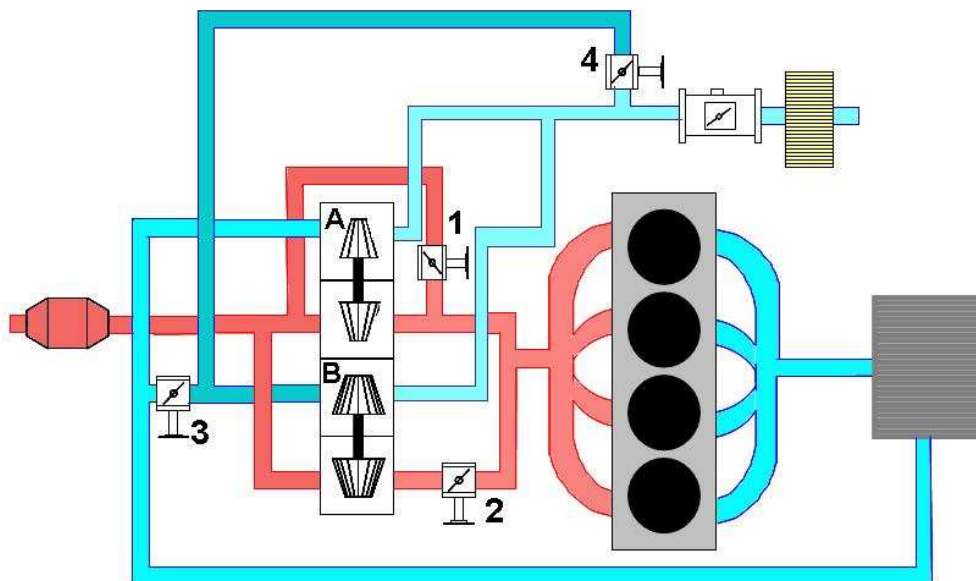


Bild 23 Schematische Darstellung der Doppelaufladung beim 2,2 HDI Bi-Turbo von PSA. Es gibt ein Wastegate auf beiden Turboladern (1). Ein Magnetventil (2) befindet sich vor dem größeren Turbolader (B), der den Durchfluss der Abgase zum Turbolader regelt. Zusätzlich gibt es ein Umluftventil (4), welches die verdichtete Luft des großen Turboladers zur Ansaugluft leitet und ein Absperrventil (3) welches die verdichtete Luft des großen Turboladers zum Ansaugkrümmer regelt.

KASTEN

Tipps im Umgang mit Turbolader

- Den Motor immer Starten ohne das Fahrpedal zu betätigen. Es dauert ein paar Sekunden, bis die Ölversorgung sichergestellt ist.
- Nie einen turboaufgeladenen Motor (insbesondere Ottomotoren) nach Fahrende sofort ausschalten, vor allem wenn er mit hoher Leistung betrieben wurde, durch die hohe Turbinentemperatur sollte man ihn etwa zehn Sekunden (je nach Temperatur sogar bis zu einer Minute) lang im Leerlauf abkühlen lassen um ein verbrennen des Öls im Bereich der Achswelle zu verhindern (**Bild 1**).
- Motoröl und Ölfilter sollten vorschriftsmäßig nach Fahrzeugherstellerangaben gewechselt werden, dabei ist auf die entsprechenden Motorölspezifikationen zu achten.
- Bei ungewöhnlichen Geräuschen sollte man schnellstens die Ursache suchen. Sollte ein fühlbares Spiel an der Welle festgestellt werden, empfiehlt es sich den Turbolader umgehend zu tauschen.
- Vor Einbau eines neuen Turboladers, eine geringe Menge Öl in den Ölkanal einfüllen.

Bild BorgWarner



Bild 1 Turbolader erreichen je nach Ausführung Dauerdrehzahlen von 50.000 1/min bis 300.000 1/min und Temperaturen von bis zu 1.050 °C.

KASTEN

Nützliche Internetadressen

Umfangreiche Infos zu Turbolader und deren Reparaturmöglichkeiten gibt es im Internet:

<http://www.de.garrettbuletin.com/technische-informationen>

<http://www.turbodrivem.com/de/turbofacts/default.aspx>

<http://www.turbos.bwauto.com>

<http://www.motair.de/>

<http://www.turbolader.de/>

<http://www.turbolader.com>

<http://www.turbolader.net>

Kasten

Pump- und Stopfgrenze von Strömungsverdichtern

Bei der untenstehenden sonderbaren Zeichnung handelt es sich um ein Kennfeld, der das Betriebsverhalten von einem Verdichter beschreibt, bei denen das Druckverhältnis über dem durchgesetzten Volumen- bzw. Massenstrom dargestellt ist. Der Arbeitsbereich im Kennfeld von Strömungsverdichtern ist auf der einen Seite begrenzt durch die Pumpgrenze, auf der anderen Seite durch die Stopfgrenze sowie die maximal zulässige Drehzahl des Verdichters (**Bild 1**).

Bild BorgWarner

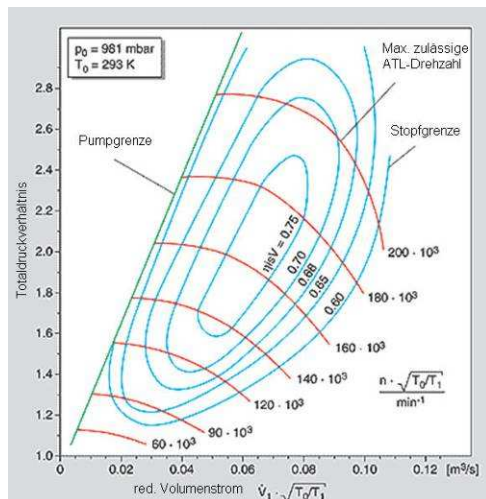


Bild 1 Verdichtungskennfeld eines Turboladers für Pkw.

Pumpgrenze

Die Pumpgrenze begrenzt den linken Kennfeldrand. Bei zu kleinen Volumenströmen und zu hohen Druckverhältnissen löst sich die Strömung von den Verdichterschaukeln. Der Kompressor kann keine konstante Strömung mehr aufrecht erhalten und der Fördervorgang wird unterbrochen. Die Luft strömt rückwärts durch den Verdichter, bis sich wieder ein stabiles Druckverhältnis mit positivem Volumenstrom einstellt. Der Druck baut sich erneut auf. Der Vorgang wiederholt sich in rascher Folge, die dadurch entstehende Druckstöße sind akustisch sehr deutlich als Geräusch (Pumpen) hörbar. Der Arbeitsbereich des Kompressors muss in einem Sicherheitsabstand von der instabilen und potentiell zerstörenden Pumpgrenze entfernt sein. Eine geschlossene Drosselklappe im Ansaugbereich kann beispielsweise ein „Pumpen“ verursachen.

Stopfgrenze

Als Stopfgrenze wird das Erreichen des maximalen Volumenstromes bezeichnet. Begrenzt durch den Querschnitt am Verdichtereintritt und dem Erreichen der Schallgeschwindigkeit am Radeintritt, wodurch kein weiteres Anwachsen des Luftdurchsatzes möglich ist. Die stark abfallenden Drehzahlkurven am rechten Kennfeldrand zeigen die Stopfgrenze im Verdichterkennfeld.

Maximal zulässige Drehzahl

Die Drehzahl des Verdichterrades ist aufgrund der Bauteilfestigkeit begrenzt. Diese ergibt sich aus der maximal zulässigen Umfangsgeschwindigkeit am Radaußendurchmesser. Übliche zulässige Umfangsgeschwindigkeiten liegen bei etwa 520 m/s bis 560 m/s. Die Berstumfangsgeschwindigkeiten heutiger Verdichterräder liegen bei etwa 700 bis 750 m/s.

Der größte Gesamtwirkungsgrad des Turboladers wird zwischen der Pump- und Stopfgrenze erreicht. Die Größe und die Art des Kompressors richten sich folglich nach dem Druckverhältnis und der Durchflussmenge, damit er so nah wie möglich am maximalen Wirkungsgrad bei normalem Motorbetrieb liegt.

KASTEN

Prüfungsaufgaben

1. Welche Vorteile haben turboaufgeladene Motoren im Vergleich zu Saugmotoren?
2. Welche Arten von Abgasturboladern unterscheidet man?
3. Wodurch unterscheiden sich Turbolader für Otto- und für Dieselmotoren?
4. Weshalb kommen vor allem bei Ottomotoren wassergekühlte Turbolader zum Einsatz?
5. Aus welchen Hauptbauteilen besteht ein Abgasturbolader?
6. Wie arbeitet ein Abgasturbolader?
7. Wie hoch ist der Ladedruck bei Pkw-Turbomotoren im Normal- und bei Vollastbetrieb?
8. Welche Arten der Ladedruckregelung finden Anwendung?
9. Welche Aufgabe hat das Ladedruckregelventil?
10. Welchen Vorteil bringt eine Ladeluftkühlung?
11. Was versteht man unter „Overboost“?
12. Wie funktioniert die Beeinflussung der Abgasströmungsgeschwindigkeit im VTG-Lader?
13. Begründen Sie die Vorteile der variablen Turbinengeometrie beim VTG-Lader.
14. Beschreiben Sie kurz die Funktionsweise der geregelten zweistufigen Aufladung?

Antworten

1. * Bessere Füllung ergibt Drehmomentsteigerung und somit höhere Leistung.
 - * Deutlich besseres Leistungsgewicht.
 - * Bei gleicher Motorleistung kleineres Bauvolumen gegenüber Saugmotoren.
 - * Energie zum Antrieb des Laders wird aus den Abgasen gewonnen.
 - * Weniger Verbrauch und geringere Emissionen bei kleineren, aber gleich starken Turbomotoren.
2. * Herkömmlicher Abgasturbolader mit mechanischer Aufladung.
 - * Abgasturbolader mit zweiflutiger Turbine (Twin Scroll).
 - * Abgasturbolader mit variabler Turbinengeometrie (VTG-Lader).
 - * Abgasturbolader mit variabler Turboaufladung mit Regelungskolben (VNTOP-Lader).
 - * Abgasturbolader in doppelter Ausführung (Twin-Turbo, Bi-Turbo).
3. Der Unterschied liegt in der Materialauswahl. Turbolader für Ottomotoren müssen hitzefester sein, weil die Abgastemperaturen wegen des schlechten Wirkungsgrads deutlich höher sind.
4. Weil bei Ottomotoren die Abgase annähernd 200 °C heißer sind als dieselmotorische Abgase, entstehen auch an der Abgasturbolader-Läuferachse Temperaturen von 1.000 °C. Ohne Wasserkühlung würde es zu Schäden an den Lagern und der Abgasturbine kommen.
5. * Lagergehäuse mit Lagern und Ölkreisanschluss.
 - * Laufzeug bestehend aus Turbinenrad, Welle und Verdichterrad.
 - * Turbinengehäuse und Verdichtergehäuse.
 - * Ladedruckregelventil.
6. Beim Abgasturbolader verdichtet ein hochdrehendes Verdichterrad die Ansaugluft. Hierzu wird das Turbinenrad von heißen Abgasströmen auf sehr hohe Drehzahlen gebracht.
7. Der Ladedruck bei Pkw-Turbomotoren liegt im Normalbetrieb zwischen 1,5 und 2,5 bar und kann bei Vollast bis zu 3 bar Absolutdruck betragen
8. * Mechanisch-pneumatische Regelung.
 - * Elektronische Regelung über Magnetventil oder elektrischen Stellmotor.
 - * Regelung mit verstellbaren Leitschaufeln.
9. Das Ladedruckregelventil begrenzt den mit steigender Drehzahl wachsenden Ladedruck und schützt somit den Motor vor Selbstzerstörung, indem ein mehr oder minder großer Abgasanteil am Turbinenrad vorbei direkt in den Auspuff geleitet wird.
10. Die beim Verdichten erwärmte Luft bekommt nach der (Ladeluft-)Kühlung eine höhere Dichte. Die Luftmasse im Zylinder wächst und sorgt bei entsprechend größerer Einspritzmenge für mehr Motordrehmoment und Motorleistung.
11. Darunter versteht man eine kurzzeitige Überhöhung des Ladedrucks zum Beschleunigen.
12. Die Beeinflussung der Strömungsgeschwindigkeit des Abgases vor der Turbine erfolgt durch Querschnittsänderung über verstellbare Leitschaufeln.
13. Mit variabler Turbinengeometrie bleiben Ladedruck und Turbinenleistung nahezu unverändert. Folge: weniger Verbrauch bei höherer Leistung. Zudem kann das Bypassventil entfallen.
14. Bei der zweistufigen Aufladung strömt Ansaugluft zuerst durch den großen Turbolader und wird dann durch den kleinen Turbolader vorverdichtet. Das Abgas hingegen strömt zunächst durch den kleinen und dann erst durch den großen Turbolader. Dadurch baut sich der leistungssteigernde Ladedruck bei niedrigen Motordrehzahlen spürbar schneller auf.