



AUTOREN



MATTHEW CORALLO

ist Senior Powertrain-Ingenieur beim Formula-Student-Team Monash Motorsport der Monash University in Melbourne (Australien).



CHRIS GROVES

leitet den Bereich Powertrain beim Formula-Student-Team Monash Motorsport der Monash University in Melbourne (Australien).

MOTIVATION

2013 startete das Formula-Student-Team Monash Motorsport ein Projekt zum Einbau eines Turboladersystems in seinem KTM 450cc Einzylindermotor. Durch die Verwendung eines selbstentwickelten Wettbewerbs-Simulators wurden verschiedene Motorenpakete untersucht. Das Team kam zu dem Schluss, dass das Einzylinder-Turboladerkonzept gegenüber anderen umsetzbaren Alternativen entscheidende Wettbewerbsvorteile hat.

WETTBEWERBSBEDINGUNGEN

Im Regelwerk des Formula-Student-Wettbewerbs ist festgeschrieben, dass ein 20-mm-Luftmengenbegrenzer (19 mm für mit E85 angetriebene Fahrzeuge) im

Luftansaugmodul zwischen der Drosselklappe und dem Motor angebracht werden muss. Zusätzlich muss der Kompressor des Turboladers, sofern verwendet, dem Luftmengenbegrenzer nachgeschaltet sein. Dieser Aufbau weicht deutlich von konventionellen Turboladern ab, bei denen der Kompressor der Drosselklappe vorgeschaltet ist. Das bringt deutliche Schwierigkeiten beim Betrieb der Turboladereinheit mit sich.

Das Öl-Schmiersystem und die Kühlung des Turboladers sind von dieser Veränderung der Betriebsbedingungen am meisten betroffen. Der Ölfluss durch den Turbolader wird durch die Drücke bestimmt, die an dessen möglichen Ausgängen herrschen – bei diesen Ausgängen handelt es sich um die Öl-Drainageleitung zum Kurbelgehäuse des Motors



TURBOAUFLADUNG EINES EINZYLINDERMOTORS FÜR DIE FORMULA STUDENT

Das Formula-Student-Team Monash Motorsport der Monash University in Melbourne (Australien) hat für seinen Einzylindermotor ein Turboladersystem entwickelt. Die Regeln des Wettbewerbs beinhalten konstruktive Vorgaben für den Turbolader, die das Team beim Systemdesign bedenken musste.

© FSG | Vishesh Vikram Singh

und durch den Wellendichtring in den Kompressor und die Turbinenseiten des Turboladers. Da der Kompressor dem Luftmengenbegrenzer vorgeschaltet ist, herrschen an dessen Einlassöffnung atmosphärische oder höhere Drücke, wohingegen der Druck im Kurbelgehäuse ungefähr dem atmosphärischen Druck entspricht – sofern es über eine adäquate Belüftung verfügt. Daher wird der Großteil des Ölflusses über die Drainageleitung zum Kurbelgehäuse zurückgeführt und nur ein minimaler Teil tritt durch die Dichtung auf Kompressorseite aus.

Wenn allerdings, wie in den Wettbewerbsregeln festgelegt, der Luftmengenbegrenzer dem Turbolader vorgelagert ist, wirken auf den Kompressor, während der Luftmengenbegrenzer nicht verwendet wird, Drücke, die geringer als der atmosphärische Druck sind. Während dieser Phase geraten große Mengen an Öl durch die Dichtung in das Ansaugsystem des Motors. Effekte auf die nachgelagerten Bauteile sind unter anderem eine partielle oder vollständige Blockade des Ladeluftkühler-Durchgangs, das Versagen vom Sensor am Ansaugsystem durch Öleinfluss sowie schlechte Zündung und die Verschmutzung der Zündkerzen durch Eindringen großer Mengen an Öl in den

Zylinder. Zudem wird ein Druckbegrenzungsventil bei einem der Drossel nachgelagerten Turbolader nicht mehr benötigt.

SYSTEMDESIGN

Der erste Kurzentwurf des Turboladerprojekts zielte hauptsächlich darauf ab, ein einfaches und zuverlässiges System zu entwickeln, das schon früh im Fahrzyklus im Fahrzeug umgesetzt werden kann. Es wurde prognostiziert, dass deutliche Vorteile durch ein relativ konservatives Turboladerpaket erzielt werden können. Daher wurde der Fokus auf eine frühe Zuführung gelegt, um die Leistung des Systems sowie insgesamt eine langfristige Zuverlässigkeit auf und abseits der Rennbahn zu bestätigen. Zusätzlich sollte die Möglichkeit bestehen, das Turboladersystem mit einem selbstansaugenden Lader auszutauschen, falls ein Versagen oder Zweifel an dessen Leistungsfähigkeit oder Zuverlässigkeit auftreten sollten.

Vorab wurden Größenbestimmungen des Turboladers durch eine direkte Skalierung der Leistungsspezifikationen eines selbstansaugenden Motors vorgenommen, um die gewünschte

TURBOCHARGING OF A SINGLE-CYLINDER ENGINE FOR FORMULA STUDENT

Monash Motorsport, the Formula Student team from Monash University in Melbourne (Australia), discusses the technical implications of developing a turbocharger system for their single-cylinder engine according to Formula Student competition rules.

MOTIVATION

In 2013, the Monash Motorsport Formula Student team embarked on a project to implement a turbocharger system onto their KTM 450cc single-cylinder engine. Through the use of an in-house developed competition simulator, various engine packages were investigated and the single-cylinder turbocharged concept was found to have a significant competitive advantage over other feasible alternatives.

COMPETITION REQUIREMENTS

The Formula Student competition rules stipulate that a 20-mm restrictor (19 mm for E85-fuelled cars) must be placed in the air intake system between the throttle body and engine. In addition, should a turbocharger be used, its compressor must be located in the system downstream of the restrictor. This varies considerably with conventional turbocharger layouts, where the compressor is located upstream of the throttle body, and introduces significant difficulties with the operation of the turbocharger unit.

Most critically affected by the change in operating conditions is the oil lubrication and cooling system of the turbocharger. The path of oil flow through the turbocharger is dictated by the pressures that exist at its possible exits, which are the oil drainage line to the engine crankcase and through the oil seals into the compressor and turbine sides of the turbocharger. With the compressor located upstream of the throttle, it experiences atmospheric or higher pressures at its inlet, while crankcase pressure is at approximately atmospheric provided adequate crankcase ventilation. Therefore, the majority of oil flow will be returned to the crankcase via the drainage line, with only minimal leakage of oil through the compressor-side seal.

However, with the throttle upstream of the turbocharger as per competition rules, the compressor can experience significantly lower than atmospheric pressures during off-throttle operation, at which time large amounts of oil are drawn through the seal and into the intake system of the engine. Downstream effects of this include partial or full blockage of intercooler passages, failure of intake system sensors due to oil ingestion, as well as poor combustion and fouling of spark plugs as a result of large amounts of oil entering the cylinder. In addition, the positioning of the turbocharger after the throttle means that a pressure relief valve after the turbocharger is no longer required.

SYSTEM DESIGN

The initial design brief for the turbocharger project focused heavily on providing a simple and reliable system to implement onto the car early in the driving cycle. It was predicted that significant gains could be achieved with a relatively conservative turbocharger package, and so emphasis was placed on early delivery in order to validate off and on-track performance of the system along with ensure overall long-term reliability. In addition to this, provision was to be made for direct interchanging of the turbocharger system with a naturally-aspirated one in the event of failure or should there be a lack of confidence in the performance or reliability of the system.

Preliminary turbocharger sizing was accomplished through direct scaling of the naturally-aspirated engine performance specifications in order to meet the target output with the turbocharger system. Required compressor pressure ratios and mass flow rates were calculated and compared with data from various turbocharger models, and the Gar-

rett MGT12, ①, was selected based on the predicted operating range, ②.

In order to ensure compatibility between the naturally-aspirated and forced-induction systems, engine internals remained unmodified. Fuel type was switched from 98RON to E85 to reduce the likelihood of knocking issues with increased in-cylinder pressures, particularly as engine compression ratio was to remain unchanged. Oil supply for the turbocharger lubrication system is taken from the engine via a cylinder-head oil gallery, and returned into the crankcase through a modified clutch cover, while water cooling is integrated into the car's existing cooling system in parallel with the engine. Fuel supply and cooling systems are upgraded to account for the greater demands placed on them by the turbocharger system.

To regulate intake charge pressure, the turbocharger's internal wastegate is activated using a pneumatic wastegate controller connected to the intake plenum via an electronic boost controller. This allows maximum intake pressures to be achieved earlier in the RPM range, as well as provides the option to customise RPM versus intake pressure profiles to

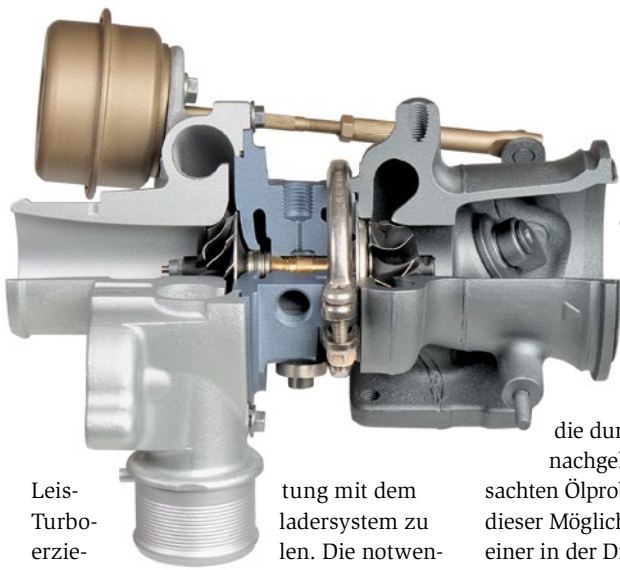
AUTHORS

MATTHEW CORALLO

is a Senior Powertrain Engineer at the Monash Motorsport Formula Student Team of Monash University in Melbourne (Australia).

CHRIS GROVES

is the Powertrain Team Leader at the Monash Motorsport Formula Student Team of Monash University in Melbourne (Australia).



1 Garrett-MGT12-Turbolader
Garrett MGT12 turbocharger

Leis-
Turbo-
erzie-
digen

Die notwendigen Druckverhältnisse des Kompressors und der Durchflussmengen wurden berechnet und mit Daten verschiedener Turboladermodelle verglichen. Letztlich wurde der Garrett MGT12, 1, basierend auf dem prognostizierten Betriebsbereich ausgewählt, 2.

Um eine Kompatibilität zwischen den selbstansaugenden und den zwangsbelüfteten Systemen zu gewährleisten, wurde das Motorinnere nicht verändert. Der Treibstoff wurde von 98RON auf E85 umgestellt, um bei größeren Drücken im Zylinder Problemen des Motor-klopfens vorzubeugen, teilweise da das Verdichtungsverhältnis des Motors unverändert bleiben muss. Die Ölzufuhr des Turbolader-Schmierstoffsystems wird über eine Zylinderkopf-Ölverteilung entnommen und über einen modifizierten Kupplungsdeckel in das Kurbelgehäuse zurückgeleitet. Das Wasserkühlsystem ist in das im Auto vorhandene Kühlsystem parallel zum Motor integriert. Die Treibstoffzufuhr und Kühlsysteme wurden aufgerüstet, um den höheren Ansprüchen des Turboladersystems gerecht zu werden.

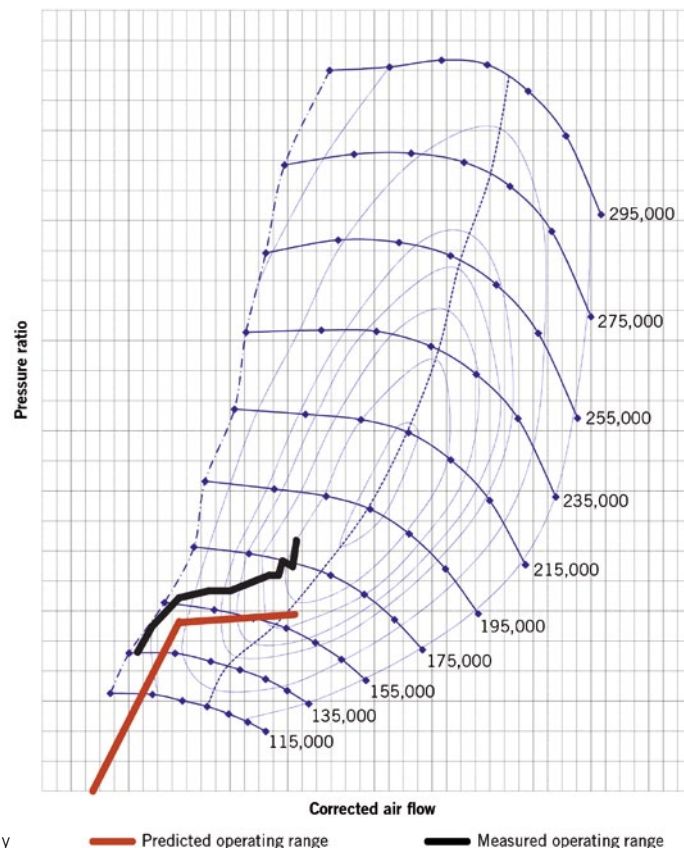
Um den Ansaug-Ladedruck zu regulieren, wird das interne Wastegate-Ventil des Turboladers durch eine pneumatische Steuerung aktiviert, die mit dem Ansaugplenum über eine elektronische Boost-Steuerung verbunden ist. Dies ermöglicht es, auch bei niedriger Drehzahl maximale Ansaugdrücke zu erzielen. Zudem ermöglicht dies eine individuelle Anpassung der Ansaug-Druckprofile gegenüber der Drehzahl und somit lassen sich die Drehmomentcharakteristiken des Motors variieren. Die angesaugte Ladeluft wird mittels eines Luft-zu-Luft-Ladeluftkühlers gekühlt. Da dieser sich über dem Ansaugplenum befindet, wird dessen Effizienz zugunsten der aerodynamischen Leistung des Fahrzeugs geopfert.

Es wurden mehrere Möglichkeiten untersucht, die durch den der Drosselklappe nachgelagerten Turbolader verursachten Ölprobleme zu korrigieren. Eine dieser Möglichkeiten war die Verwendung einer in der Drainageleitung zwischen dem Turbolader und dem Kurbelgehäuse eingebauten Absaugpumpe. Dies würde den Druck in der Drainageleitung genug verringern, um einen Rückfluss des Öls in das Kurbelgehäuse anstelle durch die Kompressordichtung und in das Ansaugsystem zu ermöglichen. Eine weitere Option war es, die Belüftungsleitung des Kurbelgehäuses mit dem Ansaugsystem des Motors der Drosselklappe nachgelagert zu verbinden. Wenn die Drossel nicht verwendet wird, wären die Druckverhältnisse zwischen dem Ansaugsystem und dem Kurbelgehäuse in etwa ausgeglichen. Dies würde dazu führen, dass die Druckunterschiede auf beiden Seiten der Kompressordichtung deutlich verringert wür-

den. Letztlich wurde die letztere Option, die Belüftungsleitung des Kurbelgehäuses mit dem Ansaugsystem zu verbinden, gewählt, da sie mit geringeren Kosten und einer geringeren Komplexität verbunden war und darüber hinaus keine elektrische Energie benötigt wird, 3.

UMSETZUNG

Erste Probeläufe mit dem Turbolader auf dem Prüfstand bestätigten, dass das Ansaugsystem immer noch Öl ansaugte, obwohl das Kurbelgehäuse in den Phasen, in denen die Drossel nicht aktiv war, in einem Ansaugvakuum gehalten wurde. Beim Vergleich des Öldrucks beim Turboladereinlass mit Empfehlungen des Herstellers stellte sich heraus, dass ersterer deutlich höher als der empfohlene Minimaldruck war, was die vorhandenen Schwierigkeiten mit dem Öldruck möglicherweise verschärfte. Der Druck des Öls auf den Turbolader wurde anschließend durch die Installation einer Messblende in der Versorgungsleitung sowie eines nachgeschalteten Öldrucksensors zur Überwachung des Versorgungsdrucks reduziert. Durch eine allmähliche Verkleinerung der Messblende wurde der Versorgungsdruck so weit reduziert, dass er den



2 Garrett-MGT12-Kompressor-Karte mit vorhergesagten und gemessenen Betriebsbereichen
Garrett MGT12 compressor map with predicted and measured operating ranges

vary the torque characteristics of the engine. Intake charge air is cooled via an air-to-air intercooler located above the intake plenum, a position which sacrifices intercooler efficiency for overall aerodynamic performance of the car.

There were several options investigated to help rectify the oil problems which would be faced with the turbocharger being downstream of the throttle body. One of these options was to use a scavenge pump located on the drainage line between the turbocharger and crankcase. This would effectively lower the drainage line pressure enough to promote oil flow back to the crankcase rather than through the compressor seal and into the intake system. An alternate option was to connect the crankcase ventilation line to the intake system of the engine after the throttle body. During off-throttle operation this would achieve an approximately uniform pressure between the intake system and the crankcase, meaning that the large pressure gradient across the compressor seal which causes the oil migration would be significantly reduced. Ultimately, the latter option of connecting the crankcase ventilation line to the intake system was chosen due to lower cost and complexity, in addition to not requiring electrical power, ③.

IMPLEMENTATION

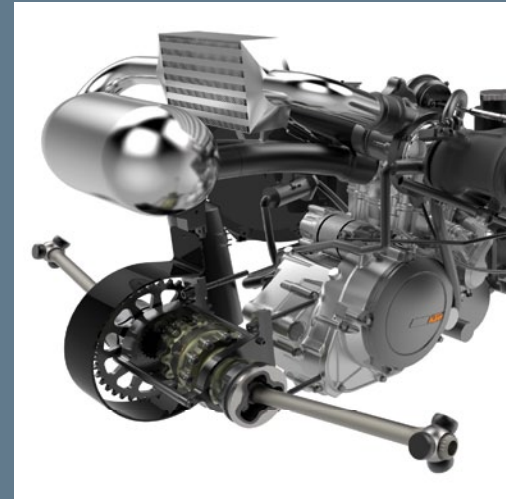
Initial test bench runs with the turbocharger system confirmed that oil was still being drawn into the intake system, despite having the crankcase under intake vacuum during off-throttle running. Comparing turbocharger oil supply pressure with manufacturer recommendations showed that it was significantly higher than the minimum recommended pressure, possibly exacerbating the present oiling issues. Oil pressure to the turbocharger was subsequently reduced through the installation of an orifice plate into the feed line, with an oil pressure sensor mounted downstream to monitor supply pressure. Through a gradual reduction in orifice size, supply pressure was reduced to a level marginally higher than minimum manufacturer recommendations, and a noticeable reduction in oil accumulation in the intake system was observed.

In an attempt to isolate oil leakage through the turbocharger from that coming through the crankcase ventilation line, a simple catch-can was installed on

the ventilation line to separate as much oil as possible from the crankcase gasses. Installation of the catch-can showed that the majority of the remaining oil being drawn into the intake system was in fact through the crankcase ventilation line rather than the compressor-side oil seal. Various locations around the engine for crankcase ventilation were investigated to reduce oil being drawn through the ventilation line, but all proved to be equivalent or inferior to the original factory location. As a result, it was decided that a crankcase ventilation line catch-can would also be necessary for the turbocharger system.

Aside from the initial oil issues experienced, test bench tuning progressed relatively smoothly. Problems with knocking, which were an early concern considering the unchanged engine compression ratio, were only experienced during aggressive ignition advances beyond peak torque values. It is expected that the use of E85 fuel contributed considerably towards this. Gradual oil loss from the engine into the catch-can was a minor issue, meaning that engine oil level needed to be checked and adjusted on a regular basis. Introduction of the turbocharger system to the car was also surprisingly successful. No technical problems occur and the driving characteristics of the car in terms of power delivery and in particular torque-to-throttle lag were not significantly affected. It was however noted that the rate at which oil was being collected in the ventilation line catch-can had increased, which was attributed to the inertial effect of driving on the oil causing it to be thrown up towards the ventilation line location.

The commencement of endurance testing with the turbocharger system unearthed yet another unexpected oil issue. While the intake system of the car was remaining relatively oil-free with the crankcase ventilation line and catch-can setup, the gradual loss of engine oil to the catch-can became quite problematic during endurance testing, and the first attempts at completing an endurance event were unsuccessful due to low oil pressure stoppages. The addition of a catch-can drainage line back to the crankcase, with a one-way valve to stop crankcase gasses being able to pass in the reverse direction, ④, allows the oil to drain back into the crankcase when the engine is shut down. This means that during a Formula Student endurance



event, any oil accumulated in the catch-can during the first half of the event will be returned to the engine during the driver swap period.

SUMMARY

The addition of the turbocharger system onto the Monash Motorsport 2013 car proved its worth that year at the Australasian FSAE competition, particularly in the acceleration event where the 2013 car completed the run in 4.20 s compared to 4.81 s for the previous year's car. This was despite the car being marginally heavier than its predecessor, and resulted in a net increase of 16.4 points in the acceleration event alone. There were also significant gains in the autocross and endurance events. From test bench data, the addition of the turbocharger resulted in a peak power increase of 25 % and average torque increase of 30 % across the operating range.

The team was extremely pleased with the outcome of the turbocharger project, and many of the rumoured difficulties associated with the turbocharging of a single-cylinder engine proved to be misconceptions. Nonetheless, there were numerous problems encountered from the initial design phase to a fully-working system on the car, particularly with the oil system and minimising oil accumulation in the intake system of the engine. Future improvements to the system will focus on tailoring the engine to better suit the change in utilised operating range with the turbocharger system, as well as enhanced integration of the turbocharger package within the car.



3 3D-Modell des gesamten Antriebsstrangs
3D model of the overall powertrain package

empfohlenen Druck nur minimal überschritt. Infolgedessen wurde eine merklich geringere Ölsammlung im Ansaugsystem beobachtet.

Beim Versuch, das Öl des leckenden Turboladers von dem, das durch die Belüftungsleitungen des Kurbelgehäuses kam, zu trennen, wurde ein einfacher Auffangbehälter an der Belüftungsleitung installiert, um so viel Öl wie möglich von den Gasen des Kurbelgehäuses zu trennen. Die Installation des Auffangbehälters zeigte, dass der Großteil des restlichen Öls in der Tat durch die Belüftung des Kurbelgehäuses anstelle der Dichtung auf der Kompressorseite eindrang. Es wurde nach alternativen Anbaustellen für die Belüftung des Kurbelgehäuses gesucht, um das Eindringen des Öls durch die Belüftungsleitung zu verhindern, aber alle stellten sich als entweder gleichwertig oder schlechter als die vom Hersteller

gewählte Lage heraus. Folglich wurde entschieden, dass ein Auffangbehälter der Kurbelgehäuse-Belüftung auch im Turboladersystem notwendig sein würde.

Abgesehen von anfänglichen Schwierigkeiten mit Öllecks verlief das Tuning auf dem Prüfstand relativ reibungslos. Probleme mit Motorklopfen, die zunächst aufgrund des unveränderten Verdichtungsverhältnisses des Motors befürchtet wurden, traten nur bei aggressiven Vorzündungen jenseits der Drehmoment-Spitzenwerte auf. Es ist anzunehmen, dass die Verwendung von E85 erheblich dazu beitrug. Gradueller Ölverlust vom Motor in den Auffangbehälter war ein geringfügiges Problem, das heißt der Ölstand des Motors musste in regelmäßigen Abständen überprüft und angepasst werden. Der Einbau des Turboladers in das Auto war ebenfalls überraschend erfolgreich. Es traten keine technischen Probleme dabei auf und weder das Fahrverhalten des Autos im puncto Leistungsentfaltung noch im Speziellen das Ansprechverhalten wurden wesentlich beeinflusst. Jedoch wurde festgestellt, dass die Rate, mit der sich Öl im Auffangbehälter der Belüftungsleitung ansammelte, anstieg. Es ist anzunehmen, dass die Trägheit des Öls beim Fahren dazu führte, dass es nach oben in Richtung der Belüftungsleitung gedrückt wurde.

Beim Beginn der Belastungstests mit dem Turboladersystem wurde ein weiteres, unerwartetes Ölproblem festgestellt. Während das Ansaugsystem des Autos durch die Verwendung des Auffangbehälters in der Belüftungsleitung relativ frei von Öl blieb, wurde der gradueller Verlust von Öl zum Auffangbecken beim

Belastungstest problematisch und die ersten Versuche, diese Belastungstests vollständig durchzuführen, scheiterten durch Motorausfälle aufgrund zu niedriger Öldrucks. Eine Drainageleitung vom Auffangbehälter zum Kurbelgehäuse mit einem Rückschlagventil wurde hinzugefügt, um ein Eindringen von Gasen des Kurbelgehäuses in die entgegengesetzte Richtung zu verhindern, 4. Dies ermöglicht es dem Öl, ins Kurbelgehäuse zurückzufließen, wenn der Motor nicht läuft. Für einen Formula Student Belastungstest bedeutet das, dass während eines Fahrerwechsels das Öl, das sich während der ersten Hälfte im Auffangbehälter angesammelt hat, zum Motor zurückgeleitet wird.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Hinzufügen eines Turboladersystems zum 2013er-Fahrzeug von Monash Motorsport hat sich beim australisch-asiatischen FSAE-Wettbewerb bewährt, insbesondere beim Beschleunigungstest Acceleration, bei dem das 2013er-Auto die Runde mit 4,20 s gegenüber 4,81 s des Vorjahreswagens abschloss. Dies geschah trotz des leicht höheren Gewichts des Wagens gegenüber seinem Vorgänger und resultierte in einer Nettoerhöhung von 16,4 Punkten alleine beim Beschleunigungstest. Beim Autocross und dem Langstreckenrennen Endurance waren ebenfalls deutliche Verbesserungen zu verzeichnen. Basierend auf Prüfstandsdaten resultierte die Ergänzung des Turboladers in einer Erhöhung der Spitzenleistung um 25 % und einer Erhöhung des durchschnittlichen Drehmoments um 30 % im gesamten Betriebsbereich.

Das Team war vom Ergebnis des Turboladerprojekts überaus zufrieden und viele der Gerüchte um Schwierigkeiten beim Turboladen eines einzylindrigen Motors stellten sich als Irrglaube heraus. Dennoch gab es eine Vielzahl an Problemen von der Entwurfsphase bis hin zu einem vollständig funktionsfähigen System im Auto, insbesondere beim Schmiersystem und bei der Verringerung von Ölsammlungen im Ansaugsystem des Motors. Künftige Verbesserungen des Systems sehen eine Anpassung des Motors vor, die besser auf die Veränderungen des Betriebsbereiches durch das Turboladersystem abgestimmt ist sowie eine verbesserte Integration des Turboladerpakets im Auto.

