



Optimering av en Ottomotor
– effekt och driftsäkerhet

Optimization of an Otto engine
– power and reliability

Oliver Olofsson
Joel Holmgren

Avdelningen för Sjöfart och Marin Teknik
Sjöingenjörsprogrammet
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2011
Examensarbete Si -11/73

Förord

Perioden med att skriva detta Examensarbete har varit väldigt lärorikt och roligt och många personer har bidragit med synpunkter och expertis.

Först och främst vill vi tacka vår handledare Mats Jarlros och grabbarna på Autotech för deras insats och justering av motorn.

Men även Yasmine Sirinyan, Emily Chapman, Fabian Hallbom, Mauritz Jadebrid, Patrik Carvall och Hampus Berggren för deras bidrag.

Oliver Olofsson

Joel Holmgren

Sammanfattning

Detta arbete påvisar att en effekthöjning kan åstadkommas på en motor som arbetar enligt Ottoprincipen med bibehållen driftsäkerhet. Slutsatser om motormodifieringar och komponentutbyten drogs efter en detaljerad litteraturstudie, teoretiska beräkningar samt intervjuer med yrkesverksamma inom området.

En överladdad 2,5 liters bensinmotor med fem cylindrar av märket Volvo användes som bas för en prototyp.

Motorn genomgick en modifiering med komponentbyten och programmering av ECU för att åstadkomma en effekthöjning från 193 till 320 hk med bibehållen driftsäkerhet.

Resultaten presenteras med figurer och beräkningar där testresultaten från motorn i original mot modifierat utförande jämförs, därefter följer en diskussionsdel om vad som kunde gjorts för att nå ett bättre resultat.

Abstract

This project determined that a power increase can be achieved on a supercharged spark aspirated internal combustion engine with maintained reliability. In order to draw conclusions regarding necessary engine modifications as well as replacements of components, a literature review on the subject was completed and theoretical calculations were made. In addition, interviews were held with professionals on the subject.

A turbocharged 2.5 liter spark aspirated engine with five cylinders of the brand Volvo was used as a base for a prototype. The engine underwent a modification including part replacement and programming of the ECU to provide a power increase from 193 to 321 hp, while maintaining reliability.

The results are presented using figures and calculations in which the test results from the engine in the original, and modified versions are compared. The results section is followed by a discussion section detailing what more could have been done to further increase the effect.

Ord och förkortningar

Ord och begrepp

ehk (power) – Effektiva hästkrafter, ehk är hk mätt på vevaxeln

hk (hp)– hästkrafter, 1 hk är 0,736 kW

Nm (torque) – Newtonmeter

Tryck (pressure) – Bar

rpm – Varv per minut

kg – Kilogram

m/s – Luftflöde

Lambdavärde - Bränsle/luftblandning mäts som syreöverskott i avgassystemet

Stökiometrisk blandning – En fullständig kemisk reaktion utan något oförbränt

ECU (Engine control unit)- Motorns dataenhet för motorstyrning

Waste gate – en bypassventil som reglerar avgasflödet genom turbons turbin

Pysventil - en bypassventil som reglerar turbotrycket till insuget på motorn

Matematiska förkortningar

D – Cylinderdiameter (meter)

S – Slaglängd (meter)

Z – Cylinderantal

π – Matematisk konstant (ansätts som 3,14159265)

η – Verkningsgrad (%)

i – Motorns arbetstakt (1 för tvåtaktsmotorer och 2 för fyrtaktsmotorer)

pme – Effektivt medeltryck (Bar)

F – Kraft (Newton)

V – Volym (m^3)

R – Individuella gaskonstanten för idealgas (ansätts som 287 Nm/kgK)

δ – Luftens densitet (kg/m^3)

M – Vridmoment (Newtonmeter)

n – Varvtal (varv per minut)

T – Temperatur (Kelvin)

Pi – Indikerad effekt (Watt)

Pe – Effektiv effekt (Watt)

Innehållsförteckning

Förord

Sammanfattning

Abstract

1.	Inledning.....	1
1.1.	Bakgrund	1
1.2.	Frågeställning	2
1.3.	Syfte och målgrupp.....	2
1.4.	Avgränsning.....	2
2.	Metod	3
2.1.	Effektmål	3
2.2.	Litteraturstudier	4
2.3.	Intervju	5
2.4.	Komponentval	6
2.4.1.	Spridare	6
2.4.2.	Avgasturbo	7
2.4.3.	Kamaxlar	9
2.5.	Driftsäkerhet.....	11
2.5.1.	Cylinderväggar.....	11
2.5.2.	Vevhusventilation.....	12
2.5.3.	Vevstakar	14
2.6.	Det praktiska arbetet.....	16
2.6.1.	Demontering.....	16
2.6.2.	Montering.....	18
2.7.	Engine Control Unit (ECU) programmering	20
2.8.	Effektmätning	21
2.9.	Teori runt effektmätning	22
3.	Resultat.....	25
3.1.	Effekthöjningen	25
3.1.1.	Förklaring effekt och vridmomentskurvor	25

3.2.	Effektmål	27
3.2.1.	Effektivt medeltryck	28
3.2.2.	Motorns luftbehov och insugstryck.....	30
3.2.3.	Den nya turbons arbetsdiagram.....	31
4.	Diskussion.....	33
4.1.	Utvärdering effektmålet.....	33
4.2.	Utvärdering driftsäkerheten.....	34
5.	Slutsats	35

Bilaga 1, teknisk data om motorn innan modifiering

Bilaga 2, Intervju med Patrik Carvall, Autotech i Trollhättan

Referenser

1. Inledning

Arbetet behandlar en effekthöjning på en överladdad Ottomotor. Genom att höja effekten antogs det att driftsäkerheten skulle påverkas negativt. Åtgärder vidtogs för att minimera denna effekt.

Det första steget i motoroptimering består i att bestämma till vilken grad man vill optimera motorn. Detta är beroende av vilken motor man har, vilka ekonomiska resurser som finns att tillgå och för vilket ändamål optimeringen är tänkt. Graden av optimering kommer i arbetet att benämnas som effektmål.

I originalutförande hade motorn en effekt på 193 ehk. Motorn beräknades att efter modifieringar producera ca 300 – 350 ehk.

I ett tidigt stadie av arbetet var det svårt att precisera hur mycket effekthöjningen kommer att påverka driftsäkerheten.

Genom intervjuer, litteraturstudier och beräkningar kommer det i ett senare skede i arbetet att visa vilka modifieringar och komponentbyten som var nödvändiga att genomföra för att nå effektmålet.

1.1. Bakgrund

För att ge en bredare bild av förbränningsmotorer kommer här ett kort avsnitt om den moderna motorns ursprung och viktiga milstolpar inom motorutveckling.

Den första förbränningsmotorn konstruerades av fransmannen Étienne Lenoir år 1860. Denna motor komprimerade inte gas-luft blandningen innan antändning utan arbetade med atmosfärstryck och kallades därför atmosfärisk gasmotor (Backlund 2011, Kuiken 2008).

År 1864 togs grundprinciperna fram för den första fyrtaktsmotorn, baserad på Carnots arbeten inom termodynamiken. Den första fyrtaktsmotorn konstruerades av Nikolaus Otto och Eugen Langen först 1876, där motorn arbetade med konstant volym vilket den fortfarande gör idag. Denna motor har givit namn åt bensindrivna motorer som än idag heter "Ottomotorer" (Backlund 2011)

De tidiga fyrtaktsmotorerna hade en verkningsgrad på ca 15 %. För att optimera dessa motorer ytterligare var man tvungen att höja kompressionsförhållandet. Akronymen Stuart insåg detta och höjde förhållandet till 3.0 (Backlund 2011)

Rudolf Diesel uppfann 1892 en motor där luften i cylindern komprimerades så mycket att det insprutade bränslet antändes utan tändstift och fick på så sätt upp verkningsgraden till 26 %. Denna motor kallas idag dieselmotor (Backlund 2011, Kuiken 2008).

1.2. Frågeställning

Hur kan en motor förbättras med avseende på effekt och prestanda med bibehållen eller ökad driftsäkerhet?

1.3. Syfte och målgrupp

Arbetet riktar sig åt personer som har ett intresse för trimning och optimering av förbränningsmotorer, och/ eller bedriver motorsport på amatörnivå. Det förutsätts även att målgruppen har en grundläggande kunskap om Ottomotorns uppbyggnad och funktion.

Vidare syftar denna rapport att ge målgruppen en ökad teoretisk förståelse om de fysikaliska fenomenen en modifierad motor utsätts för samt hur vissa parametrar förhåller sig till varandra.

I rapporten behandlas en överladdad fyrtakts Ottomotor och teorin går att tillämpa på samtliga motorer med samma arbetsprincip.

1.4. Avgränsning

Arbetet belyser de teoretiska aspekterna av en effekttökning och ger en övergripande bild av processen för motoroptimering.

Exakta detaljer gällande demontering, montering, detaljer kring val av motordelar, kringutrustning, samt detaljer kring ECU omprogrammeringen kommer inte beskrivas i detalj.

Arbetet är avgränsat att enbart behandla motorn som en enhet, således ligger kraftöverföring efter vevaxeln utanför arbetet.

Vidare kommer inte miljö eller ekonomiska aspekter rymmas inom detta arbete.

2. Metod

Här beskrivs metoder och moment i kronologisk ordning från "ritbordet" till färdig prototyp.

För att verifiera frågeställningen har litteraturstudier gjorts, en intervju med Autotech i Trollhättan hållits samt tester och beräkningar gjorts på en motorprototyp. För att säkerställa resultaten och arbetsmetoderna har Fabian Hallbom på Polestar rådfrågats.

2.1. Effektmål

Arbetet syftar till att optimera en överladdad Ottomotor till att producera en effekt mellan 300 – 350 hk. Detta benämns i arbetet som effektmålet.

För att nå effektmålet har vi undersökt och studerat en effektformel ur en teknisk formelsamling (Elovsson 1996) för att bestämma vilka parametrar som är realistiska att ändra.

$$Pe = pme \cdot \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot S \cdot z \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{1}{i}$$

De parametrar som är teoretiskt möjliga att ändra på för att få en ökad effekt (Pe) är slaglängden (S), cylinderdiameteren (D), varvtalet (n), antal cylindrar (z), antal arbetscykler (i) och motorns effektiva medeltryck (pme).

Varje parameter har studerats för att bestämma om det är praktiskt möjligt att ändra på dem. Resultaten presenteras nedan.

Antal cylindrar (z)

På befintlig motor skulle en utökning av antal cylindrar vara en orimlig modifiering då det skulle innebära en total omkonstruktion av motorn.

Öka cylinderdiameteren (D)

På befintlig motor skulle en förstoring av cylinderdiameteren vara en orimlig modifiering i förhållande till ökad effekt då det skulle innebära en total omkonstruktion av motorn.

Att öka slaglängden (S)

På befintlig motor skulle en förlängning av slaglängden vara möjligt, men det är en orimlig modifiering då det skulle innebära en total omkonstruktion av motorn.

Öka antal arbetscykler (i)

På befintlig motor skulle ändring av arbetscykler vara en orimlig modifiering då befintlig motor är konstruerad efter 4-taktsprincipen.

Öka Varvtal (n)

Enligt effektformeln skulle rent teoretiskt en högre effekt vara möjligt genom att öka varvtalet.

I verkliga förhållanden är en motor anpassad att vara effektiv på ett begränsat varvtalsintervall, detta på grund av kamaxlarnas konstruktion samt turbokarakteristik. Se avsnitt om kamaxlar och resultat för utförligare förklaring.

Höja effektivt medeltryck (pme)

En höjning av motorns effektiva medeltryck är den parameter som är rimligast att ändra på, och kommer således vara den metod i arbetet som kommer att användas för att höja effekten på motorn.

2.2. Litteraturstudier

En litteraturstudie utfördes på ämnet förbränningsmotorer. Som grund utgick vi ifrån Internal Combustion Engine Fundamentals (Heywood 1988) och Introduction to Internal Combustion Engines (Stone 1999) vilka är omfattande verk vilka övrig relevant litteratur refererar till.

Följande kapitel i ovan nämnda böcker har varit speciellt intressanta för examensarbetet:

Internal Combustion Engine Fundamentals (Heywood 1988)

- 2. Engine types and their operations
- 3. Thermochemistry of fuel-air mixtures
- 5. Ideal models of engine cycles
- 9. Combustion in ignition engines
- 13. Engine friction and lubrication
- 15. Engine Operating Characteristics

Introduction to Internal Combustion Engines (Stone 1999)

- 2. Thermodynamic principles
- 4. Spark ignition engines
- 6. Induction and exhaust processes
- 9. Turbocharging

Som underlag till beräkningar har Energiteknik Formler och tabeller (Elovsson 1996) används samt ovan nämnd litteratur.

För att fördjupa kunskaperna inom driftsäkerhet har Driftsäkerhet och underhåll (Johansson 1997) används.

2.3. Intervju

För att bestämma hur motorns effektiva medeltryck kunde höjas och effektmålen uppnås med bibehållen driftsäkerhet har yrkesverksamma personer inom området konsulterats. En intervju återfinns i sin helhet i bilaga 2.

Utöver intervjun har även Fabian Hallbom fungerat som teknisk rådgivare med uppgift att granska och verifiera de olika metoderna och slutsatserna i arbetet. Fabian Hallbom är bilmekaniker på Lani Bil AB i Helsingborg och arbetar säsongvis som mekaniker åt Volvos racingteam Polestar.

Intervjun med Patrik Carvall på Autotech i Trollhättan hölls med syfte att få svar på frågor kring motoroptimering.

Intervjun var en semi-strukturerad intervju där frågor ställdes om motoroptimering och aktuell motor. Med semi-strukturerad intervju menas att specifika frågor ställdes för att få så exakta svar som möjligt samt att vi mellan frågorna lät ordet vara fritt för att skapa oss en bredare bild om ämnet. Vi var intresserade av att fördjupa våra kunskaper inom motoroptimering och speciellt då motoroptimering av en överladdad Ottomotor.

Den inledande frågan handlade om hur man lättast kan höja effekten på en överladdad bensinmotor. Enligt Autotech är en ECU programmering (kapitel 2.7.) det mest effektiva alternativet som således resulterar i ett högre insugstryck.

Eftersom vi hade ett effektmål och en viss motor att utgå ifrån, undrade vi om enbart denna metod gick att tillämpa på vår motor för att nå målet. Patrik med kollegor ansåg att målet ej kunde nås med enbart en omprogrammering av bilens ECU. Det rekommenderades att byta till större turbo, större spridare och ett större avgassystem.

Baserat på beräkningar och intervjun med Autotech, drog vi slutsatsen att motorns hållfasthet blir otillräcklig med vårt effektmål.

Enligt grundläggande termodynamik (Elovsson 1996) så kommer motorn att utsättas för ett högre energiintag per arbetscykel vilket kommer att påverka motorns förmåga att behålla sin ursprungliga driftsäkerhet.

För att lösa problemen med motorns hållfasthet och ursprungs konstruktion fick vi rådet att vidta följande åtgärder:

- byta till kraftigare vevstakar
- förbättra vevhusventilationen
- förstärka cylinderväggarna

Mer information om komponentbyten finns under rubriken 2.5. Driftsäkerhet.

2.4. Komponentval

Intervjun med Autotech ledde till att fem komponenter förändrades eller byttes ut för att nå uppsatt effektmål.

Komponenterna som berördes var

- Avgasturbo,
- spridare,
- avgassystem,
- intercooler, och
- motorns ECU

Avgassystemet samt intercooler byttes men detta hamnar utanför rapportens avgränsning och kommer inte tas upp i arbetet.

Omprogrammering av motorns ECU gjordes efter monteringsarbetet, mer om ECU programmering finns under rubrik 2.7. Electric Control Unit (ECU).

Vidare behandlar detta kapitel även komponenter som påverkar motorns karakteristik och effekt, vilket gör att kamaxlar också inkluderas.

2.4.1. Spridare

Ett ökat luftflöde genom motorn kräver proportionellt lika mycket mer bränsle så en stökiometrisk förbränning kan ske. Enligt Autotech var inte kapaciteten på befintliga bränslespridare tillräcklig.

Med Autotechs erfarenhet rekommenderade de en spridare med större kapacitet. Rätt storlek på bränslespridaren kunde senare verifieras med hjälp av en formel från Bosch. Den blå spridaren ersatte den röda enligt bilden nedan.



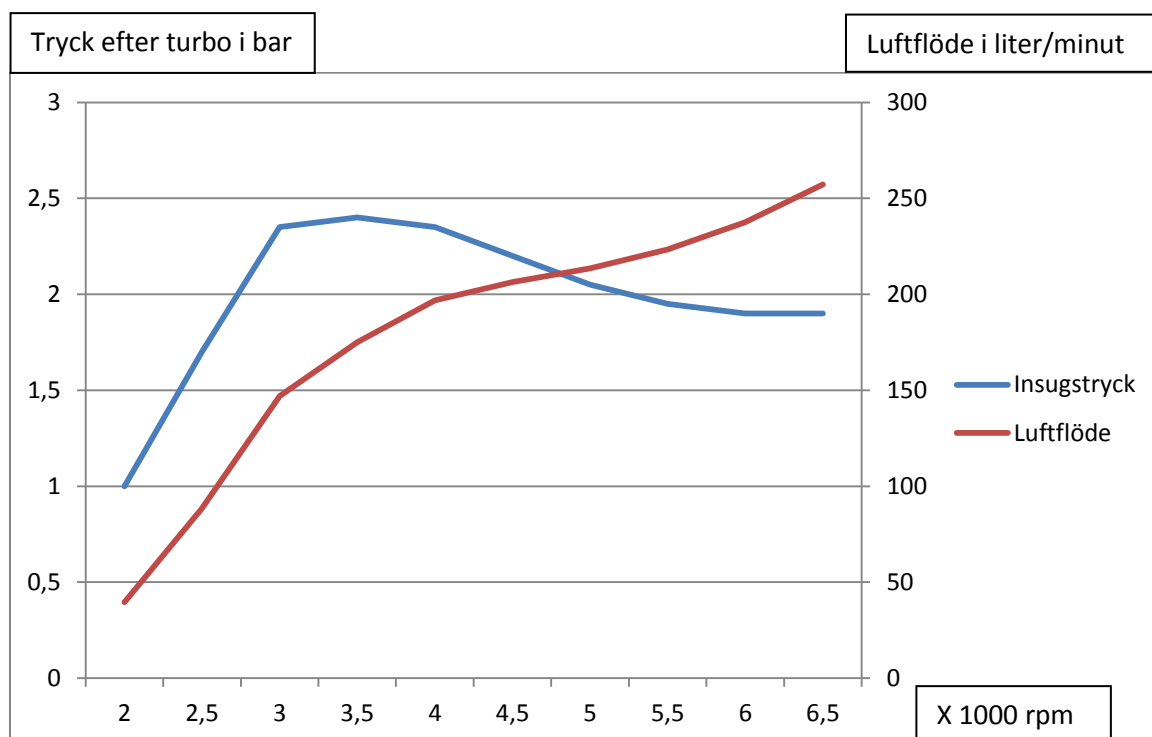
Bild 1. Spridarserie från Bosch (Bosch Engineering 2011)

2.4.2. Avgasturbo

Efter intervjun med Autotech drogs slutsatsen att befintlig turbo på motorn inte skulle räcka för att nå effektmålet. Det var då nödvändigt att byta till en turbo med större kapacitet. Autotech rekommenderade en turbo i samma serie som tidigare, (Mitsubishi TD04-19T) för att underlätta monteringen där flänsar för oljesystem samt kylsystem var desamma som originalturbon.

Figur 1 nedan beskriver det luftbehov motorn skapar med den nya turbon. Vid 5000 rpm är motorns luftbehov ca 220 liter då effekten är 320 hk.

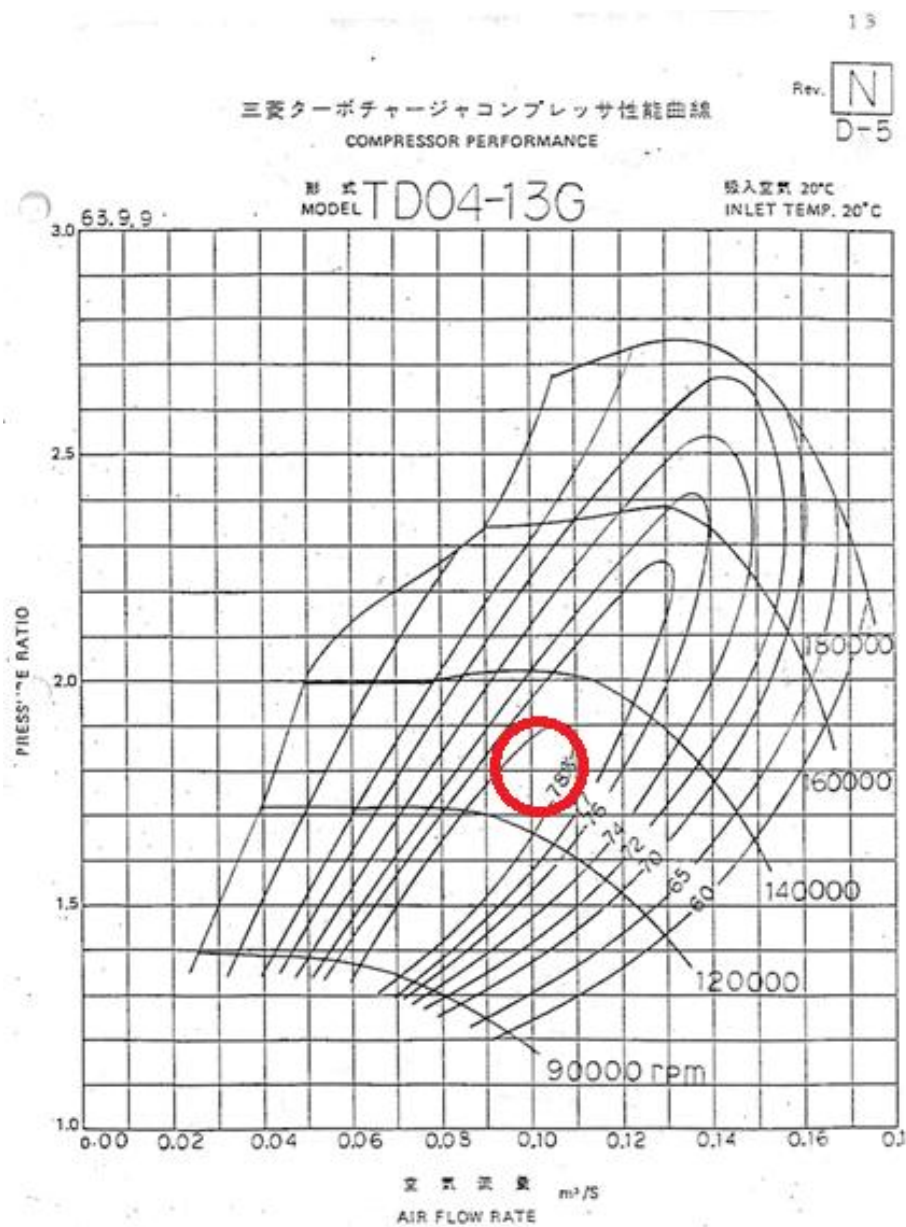
Originalturbons (TD04 13G) arbetsdiagram, figur 2, visar att turbon arbetar med högst verkningsgrad när den levererar runt 100 liter luft per sekund, vilket inte är tillräckligt för att uppnå effektmålet.



Figur 1. Graf med två y-axlar där förhållandet mellan luftflöde och insugstryck med avseende på varvtal (egna mätningar och uträkningar på den nya turbon)



Bild 2. Den nya turbon, Mitsubishi TD04 19T (egen bild)



Figur 2. Originalturbons arbetsdiagram med bäst arbetsområde markerad (Lucius 2011)

Figur 2 visar tryckförhållandet på y-axeln, luftflödet i x-axeln. Sträcken mitt i arbetsdiagrammet visar turbon verkningsgrader och varvtal.

2.4.3. Kamaxlar

Kamaxlarnas inverkan på en förbränningsmotor är väldigt stor, de styr när och hur länge gasväxlingen i cylindern ska ske. På motorn i arbetet finns två överliggande kamaxlar, där en styr avgasventilerna och den andra insugsventilerna.

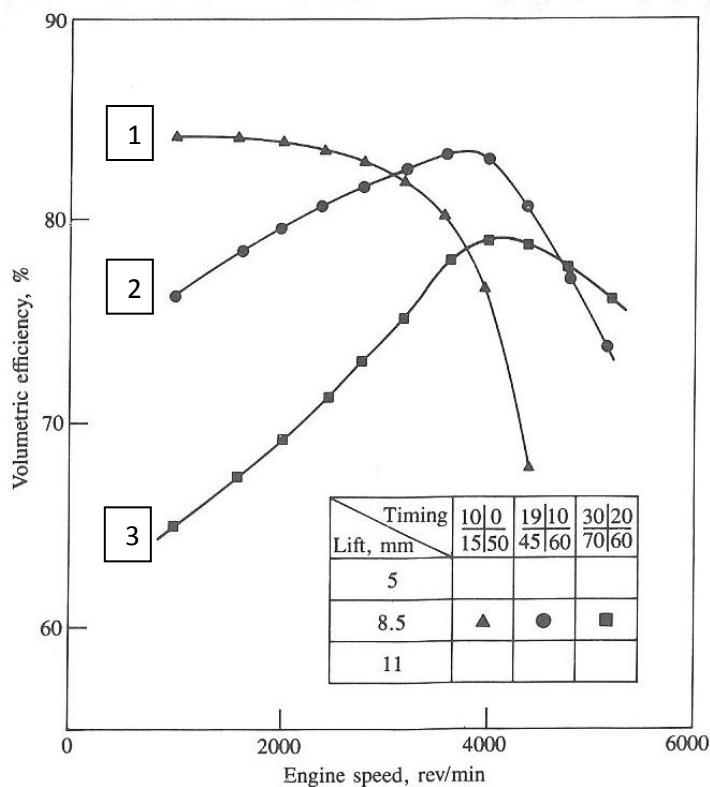
När varvtalet ökar blir ventilöppningstiderna kortare då kamaxelns varvtal är proportionerligt mot varvtalet. Kamaxlarna på motorn i arbetet går inte att ändra under drift som en del nya motorer, som använder variabla ventilöppningstider.

I arbetet har vi valt att behålla original kamaxlar, då ett byte av kamaxlar skulle innebära ytterligare komponentbyten. Det antogs att effektmålet skulle vara möjligt att uppnå med befintlig kamaxel.

Motorn i detta arbete har kamaxlar designade med korta öppningstider, som i figuren 3 motsvarar en kurva mellan fall 1 och 2. Det får till följd att turbon arbetar som bäst vid lägre varvtal, för att sedan försämrats vid högre varvtal.



Bild 3. Utformning av kamaxlar på en förbränningsmotor (Speed Alliance 2011)



Figur 3. Olika fall av ventilöppningstider (Heywood 1988)

Figur 3 visar den volymetriska verkningsgraden som funktion av ventilöppningstider och varvtal och är en modell för att påvisa skillnaden på ventilöppningstiderna. Det är inga exakta värden för motorn i detta arbete utan ger en generell bild av hur olika kamaxlars design påverkar motorns karakteristik.

Den varierande verkningsgraden beror på att kompressionsförhållandet ändras med olika kamaxlar.

Kurva 1

En kamaxel med korta ventilöppningstider ger en hög verkningsgrad på låga varvtal och en försämrad verkningsgrad vid högre varvtal. Högre varvtal leder till att gasutväxlingen inte sker optimalt. Detta är lämpligt när en motor avser att köras med lägre varvtal (Stone 1999).

Kurva 2

En kamaxel med medellånga öppningstider ger i början en högre verkningsgrad med ökat varvtal till för att sedan minska. Medellånga ventilöppningstider är lämpligt att ha på motorer där man avser att variera varvtalet, för att på så sätt kompromissa om effektiviteten (Stone 1999).

Kurva 3

En kamaxel med långa ventilöppningstider ger en mycket dålig verkningsgrad på låga varvtal men betydligt bättre på höga varvtal. Detta på grund av att delar av bränsleblandningen pressas ut av kolven genom ventilerna innan de hinner stängas, vid högre varvtal kommer ventilöppningstiderna stämma bättre överens med varvtalet. Långa ventilöppningstider är alltså lämpligt när motorn avser att köras med höga varvtal och är vanligt inom motorsport (Stone 1999).

2.5. Driftsäkerhet

För att lösa problemen med motorns hållfasthet och ursprungs konstruktion fick vi rådet att vidta följande åtgärder:

- förstärka cylinderväggarna
- förbättra vevhusventilationen, och
- byta till kraftigare vevstakar

2.5.1. Cylinderväggar

Cylinderväggarna kan spricka

Med vägledning från Autotech beslutades det att cylinderväggarna behövde förstärkas eftersom spår är frästa mellan cylindrarna, vilket ökar risken för sprickbildning. Spåren är ursprungligen designade som en kanal för kylvatten.

Åtgärd

Genom att montera shims mellan spåren elimineras risken för att cylinderväggarna sviktar vid det nya höga topstrycket som uppstår. Shims är tunna metallbleck som pressas in i utrymmet mellan cylinderväggarna, på bild X syns shimsen som avlånga metallbleck mitt i bilden.



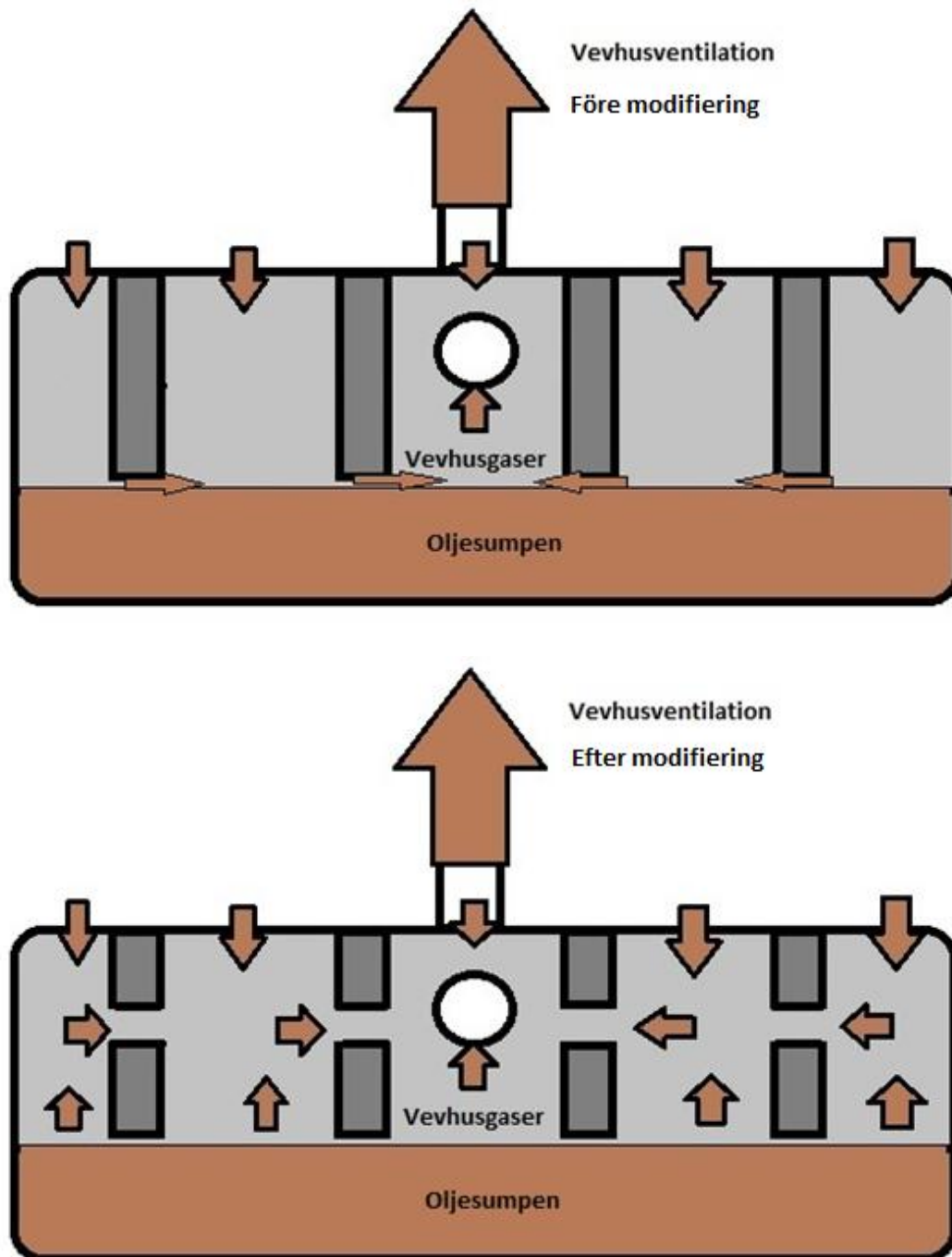
Bild 4 Shims monterade mellan cylinderväggar (egen bild)

2.5.2. Vevhusventilation

Vevhusventilationen är otillräcklig

Under intervjun på Autotech rekommenderades att modifiera segregeringarna i vevhuset på ett sätt så att vevhusgaserna lättare kan ventileras. Detta på grund av det ökade vevhustrycket, vilket är ett resultat av det nya högre medeltrycket. Segregeringar är väggar i vevhuset med funktion att ge stöd för vevaxeln genom ramlagren.

Ventilationen av vevhusgaser sker i originalmotorn endast genom ett litet utrymme under segregeringarna, och således ventileras inte hela vevhuset på ett tillfredställande sätt.



Figur 4. Illustrering vevhusventilation före och efter modifiering(egen illustration)

Åtgärd

Fönster frästes upp mellan segregeringarna i motorns vevhus. Detta gör att trycket minskar mellan segregeringarna och vevhusgaserna tar sig ut lättare.



Bild 5. De rektangulära fönstren på undre delen av bilden är resultatet av den förbättrade vevhusventilationen (egen bild)

2.5.3. Vevstakar

Standard vevstakar kan komma att böjas på grund av det nya högre vridmomentet, vilket är ett resultat av det nya högre insugstrycket.

För att kunna utnyttja den nya turbons effekt så optimalt som möjligt rekommenderade Autotech att byta vevstakar till en kraftigare modell.

De nya medeltryckkrafterna (p_{me}) kan beräknas med hjälp av effektformeln (Elovsson 1996).

$$p_{me} = \frac{P_e}{\frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot S \cdot z \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{1}{i}}$$

Kraften (F) är produkten av det effektiva medeltrycket (p_{me}) multiplicerat med kolvarean.

$$F = p_{me} \cdot \frac{D^2 \cdot \pi}{4}$$

Eftersom turbon utnyttjas effektivt på lågt varvtal kommer ett högt vridmoment uppstå, vilket resulterar i en högre medeltryckskraft på kolven.

Motorns högsta medeltryck råder då vridmomentet är som högst.

Genom att använda resultaten från motorbromstestet i formeln ovan har en punkt från figur (Elovsson 1996) för högsta medeltryck beräknats.

Det högsta medeltrycket för originalmotorn råder vid ca 2500 rpm som är 17,5 bar.

För modifierad motor råder det högsta medeltrycket vid 3500 rpm, som är 30 bar.

	Original	Modifierad
Högst medeltryck	17,5 bar	30 bar
Störst kraft på kolven	9468N	16230N

Effektökningen resulterade i en tryckökning på vevstakarna med 71 %

Åtgärder

Befintliga vevstakar byts till vevstakar med ett H-profilsformat. På så sätt kan en ökad hållfasthet i förhållande till vikt uppnås.



Bild 6, de nya vevstakarna (egen bild)

2.6. Det praktiska arbetet

2.6.1. Demontering

Alla kontakter, motorfästen, vatten, oljeanslutningar, drivaxlar mm avlägsnades och demonterades. Motorn lyftes ur motorrummet med hjälp av en motorlift, där sedan växellådan samt svänghjul med tillhörande koppling avlägsnades.

Motorn monterades i ett motorstativ med möjlighet att rotera 360 grader. Oljan tappades ut och all kringutrustning som grenrör, pumpanordningar, servo, turboaggregat mm avlägsnades.

Därefter avlägsnades oljetråget och motorns allmänskick överblickades och en inspektion av lagerhalvorna och vevtapparna gjordes.

Vidare avlägsnades topplock samt vevstakar med tillhörande kolvar efter vilket motorn kunde inspekteras i avseende på vändkanter i cylinderloppen och om repor och allmän förslitning av motorn förekom.

Till sist totaldemonterades motorn i minsta detalj och samtliga delar flyttades till en verkstad för vidare arbete.



Bild 7. Motorn lyfts ur motorrummet (egen bild)



Bild 8. Motorn i motorstativet med det mesta av kringutrustning demonterat (egen bild)

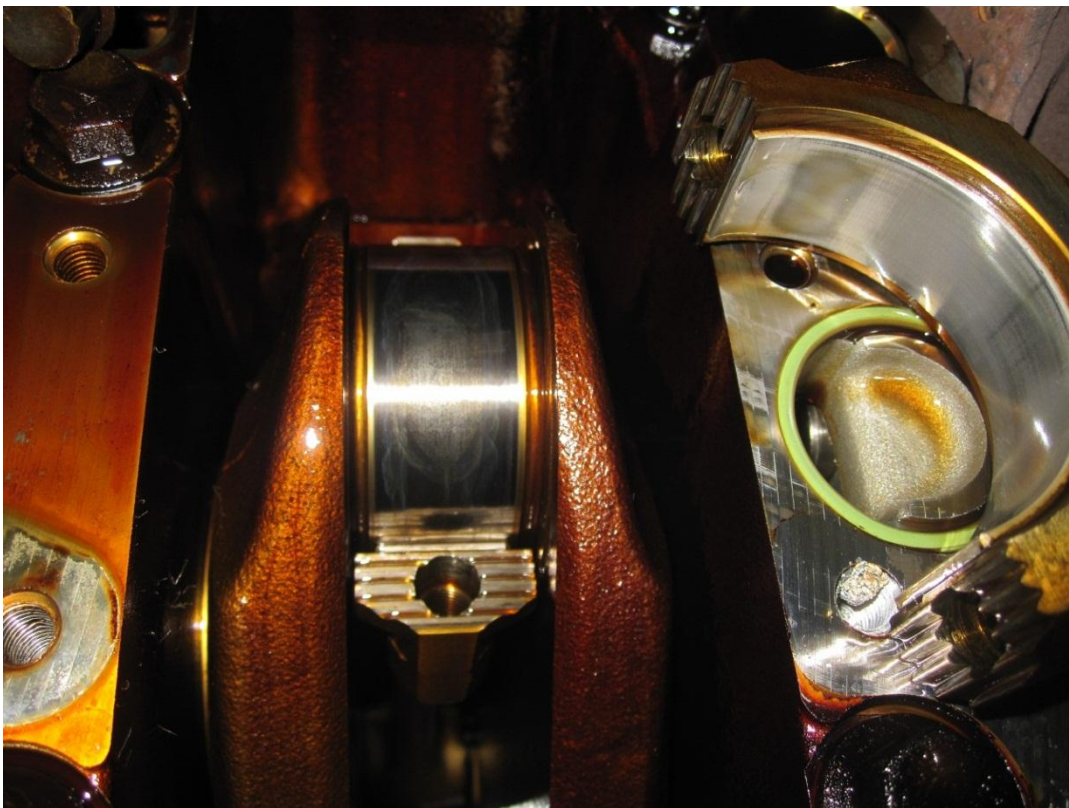


Bild 9. Vevlagerinspektion (egen bild)

2.6.2. Montering

Samtliga motordelar rengjordes i en hetvattentvätt och i en ultraljudstvätt för att säkerställa att ingen smuts och oljerester förekom. Vilka delar som behövde modifieras återfinns under rubriken driftsäkerhet. När alla delar fanns tillgängliga och alla nödvändiga verktyg, lim, packningar osv fanns tillhanda kunde monteringen påbörjas.

Monteringen skedde i stort sett i motsatt ordning som motorn demonterades, men till skillnad från demontering så har en montering krav på att vissa moment på skruvförband dras korrekt. Motorn behövde även "nollställas" så att ventilerna öppnar vid rätt tidpunkt.

Motorn monterades ihop utan några anmärkningsvärda problem för att därefter sänkas ner i motorutrymmet på bilen igen.

Vidare anslöt vi alla kablar och nödvändiga slangar för att sedan fylla på diverse oljor och kylarvatten.

För att inte skada lagren vid uppstart så avlägsnades tändstiften och motorn drogs runt med startmotorn några sekunder tills oljetrycket var tillräckligt högt.

Motorn startade på några runddragningar och gick sedan med en jämn tomgång.



Bild 10. Blocket innan påbörjad montering (egen bild)



Bild 11. En kolv och en vevstake som ska anslutas till varandra (egen bild)

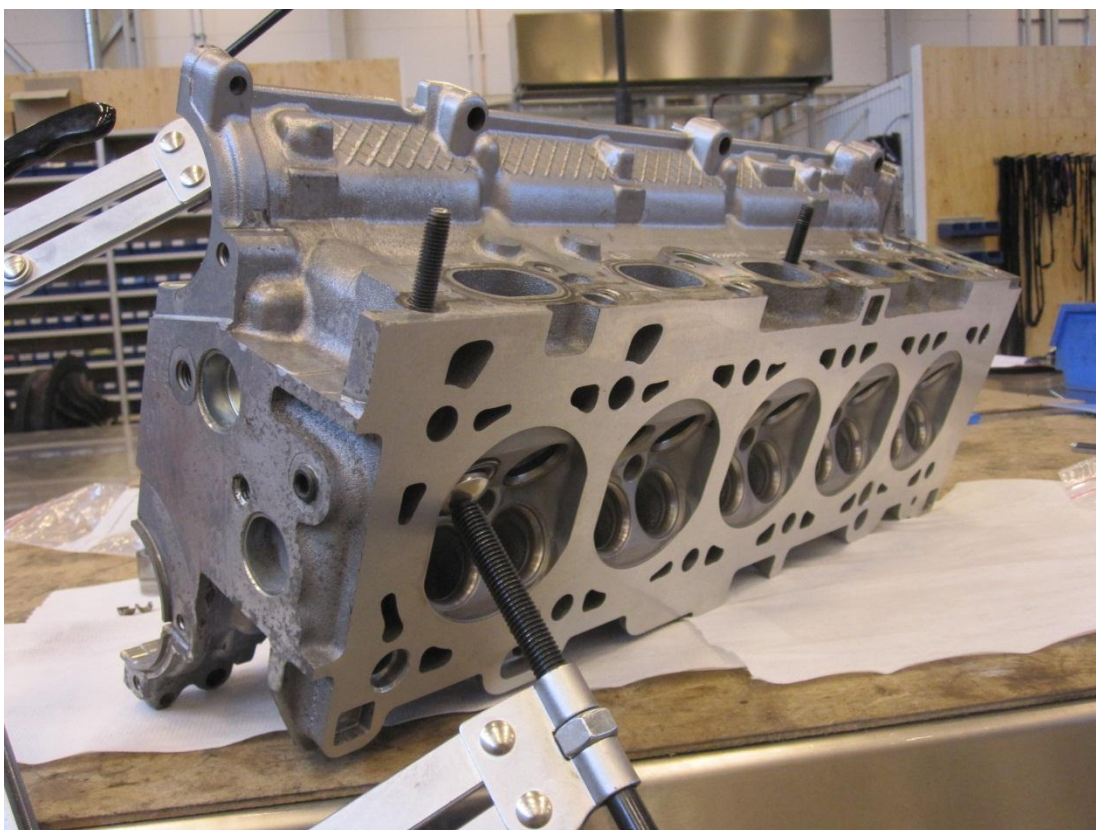
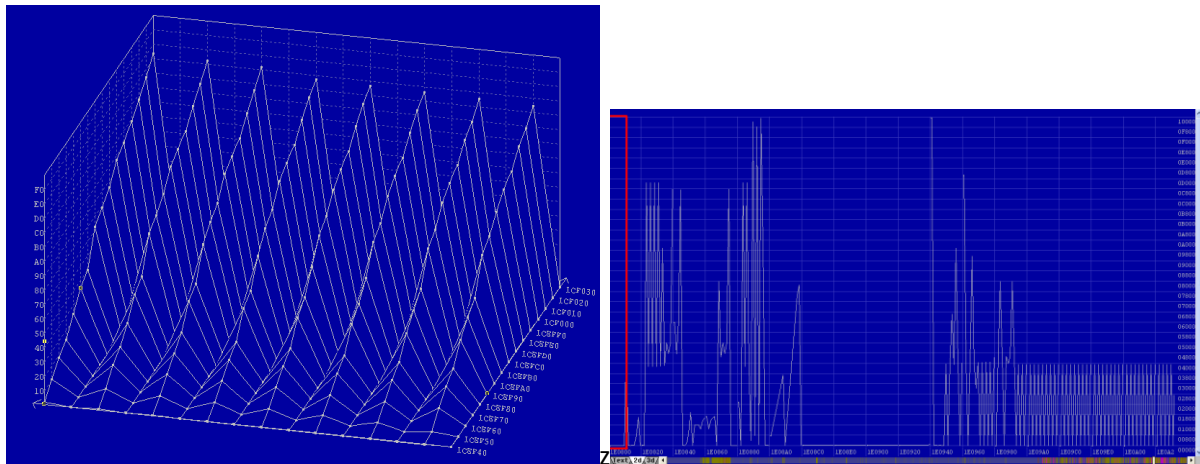


Bild 12. Ventiler monteras i topplocket med hjälp av en ventilkompressor (egen bild)

2.7. Engine Control Unit (ECU) programmering



Figur 5. Information om motorns tillstånd kan utläsas i denna figur (Autotech)

Efter att motorn har modifierats med bland annat en större turbo och bränslespridare ställs motorns inför nya försämrade driftförhållanden vad gäller mängd bränsle, mängd luft, tändningstider med mera. Grundmotorn är optimerad för ett visst förhållande vilket innebär att när motordelar byts som påverkar de termodynamiska processerna måste dataenheten (ECU) programmeras om för att stökiometrisk blandning ska gälla igen.

Processen bestod ut av att bilens ECU omprogrammerades för de nya driftförhållandena, detta gjordes på Autotech i Trollhättan. Programmeringen utfördes i deras bromsbänk där motorn bromsades och kördes vid olika lastfall. Se mer om Effektmätning på kapitel 2.8.

Motorns alla parametrar anslöts till en dator som är kopplad till motorbromsen så att processen kunde övervakas i detalj. Varvtal, insugstryck, lambdavärde, avgastemperatur, omgivande temperatur och luftfuktighet är parametrar som mäts. Även ett stetoskop anslöts till motorblocket för att med hjälp av hörselkåpor höra om motorn knacker när den belastas hårt.

Ett specifikt varvtal med en specifik last kräver en specifik mängd luft, en specifik mängd bränsle och en specifik tändningstid för att en fullständig och kontrollerad förbränning (stökiometrisk blandning) ska äga rum.

Sammanfattningsvis är målet att kunna köra motorn med full last genom hela varvtalsregistret och behålla stökiometrisk blandning. Detta försåras med en turbo men med hjälp av avlastningsventiler som waste gate, och pysventil regleras insugstrycket så en stökiometrisk blandning kan uppnås.

2.8. Effektmätning

Effektmätning sker genom ett motortest, även kallad bromsbänktest. Bromsbänken består av en plattform där bilen rullas upp på. Det drivande hjulparet ställs på en rulle. Rullen är kopplad till en dynamometer där ett magnetfält bromsar rullen som en generator, här kan olika lastfall simuleras via en dator.

Bromsbänken används under ECU programmeringen, då körs bilen i intervaller och småjusteringar görs för att under nästa test analysera förändringarna och dra slutsatser. Fördjupning av ECU programmering finns under kapitel 2.7.

När programmeringen är klar blir nästa moment att mäta motorns vridmoment genom hela varvtalsregistret. Med vridmomentet och varvtalet kan datorn nu beräkna motorns effekt och presentera denna på en graf, denna graf kallas effektdiagram och återfinns som figur 5 under 3.1 Effekthöjningen.

Testet gjordes på modifierad motor efter att optimeringen var klar. Resultatet jämfördes senare mot en motor av samma typ, men som är några år nyare och har en lite större turbo och ett bättre styrsystem.



Bild 13. Motorbroms (PJ Speed Shop 2011)

2.9. Teori runt effektmätning

Förhållande till effekt, vridmoment och varvtal

Enligt Internal Combustion (Heywood 1988) är vridmomentet motorns förmåga att uträtta arbete och effekten definieras som utfört arbete per tidsenhet.

Vridmomentet mäts i Newtonmeter och kan beskrivas som den kraft som driver vevaxeln, ju högre vridmoment ju högre kraft drivs vevaxeln på med.

Formel (Elovsson 1996) för förhållande mellan vridmoment, varvtal och effekt

$$P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

P = effekt i watt

M = vridmomentet i Nm

n = varvtalet i varv/sekund

Vridmomentet ökade från 270 Nm till 492 Nm vilket ger en ökning med 82 %

Enligt formeln ovan förhåller sig varvtal, vridmoment och effekt till varandra så att ett högt vridmoment ger hög effekt på lågt varvtal och när varvtalet ökar kommer vridmomentet att minska, men nödvändigtvis inte effekten i samma utsträckning, då det finns motorer som är designade att arbeta med höga effekter på höga varvtal.

Mekanisk verkningsgrad

Mekanisk verkningsgrad (η_{mek}) är förhållandet mellan indikerad effekt (P_i) och effektiv effekt (P_e) och anger hur mycket effekt som försvinner mellan den effekt förbränningsgaserna trycker på kolven och den effekt vevaxeln snurrar med. Förlusterna består av inre friktion i motorn, kylvattenpumpar och andra anordningar som är direkt drivna av motorn.

Mätning av effekt ger den effektiva effekten (P_e). För att räkna fram en indikerad effekt (P_i) behövs en mekanisk verkningsgrad (η_{mek}).

$$\eta_{mek} = \frac{P_e}{P_i} \rightarrow P_i = \frac{P_e}{\eta_{mek}}$$

Den mekaniska verkningsgraden (η_{mek}), är svår att bestämma och varierar kraftigt med varvtal och last. Den har angivits till mellan 75 % och 90 % i Internal Combustion fundamentals (Heywood 1988). Därför har vi valt att räkna med det effektiva medeltrycket och effektiva effekten.

Förhållandet mellan tryckändringarna med avseende på belastning kommer vara detsamma då den mekaniska verkningsgraden är en konstant i båda ekvationerna

Volymmetrisk verkningsgrad

Den volymmetriska verkningsgraden är en fundamental del vad gäller effekthöjning av motorer och är något som måste tas hänsyn till vid motoroptimering.

Den volymmetriska verkningsgrad på en sugmotor är ett förhållande mellan hur mycket luft en kolv kan suga in och hur mycket luft som faktiskt kommer in i cylindern. Vid konventionella sugmotorer sugs luften in och arbetar med ett undertryck i insuget. Utformningen och designen på insug, kanaler, utblås med mera kommer att påverka den volymmetriska verkningsgraden då gasutväxlingen och genomströmningen inte kan ske i en snabbare takt och kommer således begränsa motorns effekt vid en ökning av varvtal (Heywood 1988).

Ett normalt värde för den volymmetriska verkningsgraden på en sugmotor ligger mellan 80 och 90 % (Heywood 1988).

På en överladdad motor kan man använda den volymmetriska verkningsgraden för att undersöka förluster mellan turbon och cylindern. Förlusterna uppstår då luften ska passera genom intercooler, insugskanaler och insugsventiler. När varvtalet ökar förkortas också insugstiderna och luften får svårare att strömma in i cylindern.

Densiteten (ρ) sätts då till densiteten på luften i cylindern. Luften är på en överladdad motor ett övertryck det vill säga ett tryck högre än atmosfärstrycket 1,013 bar. Luftmassan mäts som den mängd luft som faktiskt finns i cylindern.

Formel för volymmetrisk verkningsgrad (η_v) (Heywood 1988):

$$\eta_v = \frac{m}{\delta \cdot V} \cdot 100$$

η_v = Volymmetrisk verkningsgrad (%)

δ = Luftens densitet (kg/m^3)

V = Slagvolymen i cylindern (m^3)

m = luftmassan i cylindern (kg)

Då den verkliga luftmassan som sugas in i motorn är svår att mäta har inga fullständiga uträkningar gjorts på den volymmetriska verkningsgraden i hela varvtalsregistret.

För att beräkna densiteten i cylindern används gasernas allmänna tillståndslag (Elovsson 1996).

$$\delta = \frac{p}{R \cdot T}$$

R = Individuella gaskonstanten för idealgas

T = Temperatur luft efter intercooler

p = Trycket i cylindern

δ = Densiteten luft i cylinder

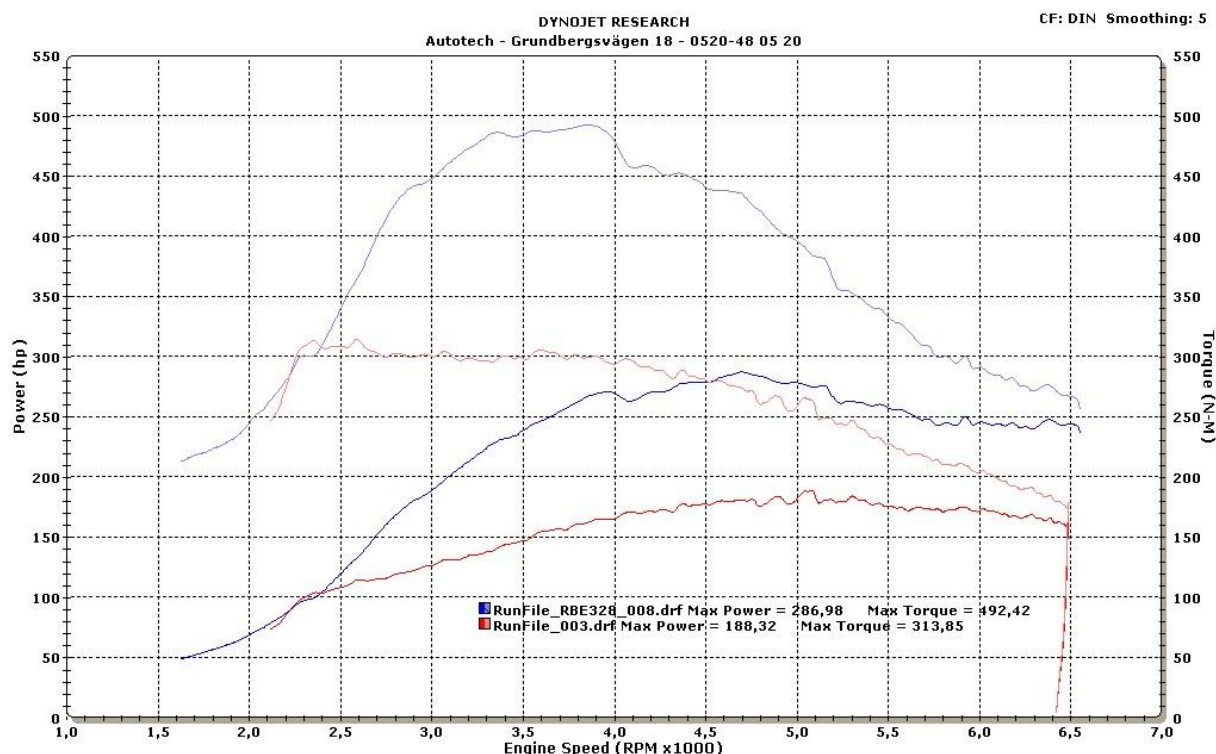
Som exempel kan densiteten (δ) beräknas på den nya turbon när den levererar 2.4 bars tryck, R sätts då till 287 Nm/kgK, T till 300K (27 grader Celsius) och p till $2.4 \cdot 10^5$ Pa (2.4 bar)

Densiteten (δ) blir då 2.67 kg/m^3

3. Resultat

Resultatet från motoroptimeringen presenteras under detta kapitel.

3.1. Effekthöjningen



Figur 5. Jämförelse mellan modifierad motor och snarlik original motor (Autotech)

3.1.1. Förklaring effekt och vridmomentskurvor

Originalmotorns effektkurva, undre röd kurva.

Grafen visar en jämn och mjuk kurva, vilket kan tolkas som att turbo och kamaxlar är väl anpassade för varandra. Resultatet på originalkurvan kan beskrivas som att målet är att motorns karakteristik skall upplevas som "snäll och jämn" över hela registret. Det leder till en mer lätthanterlig bil.

Originalmotorns vridmomentskurva, övre röd kurva.

Även här är kurvan jämn som är ett resultat av väl anpassad turbo samt kamaxlar. Insugstrycket är anpassat så att inte ett högt och skadligt vridmoment uppstår.

Modifierade motorns effektkurva, undre blå kurva.

Vid ca 2500 rpm höjs insugstryck med luftflöde till ca 2,4 bar. Det resulterar i att vridmomentet ökar markant och således effekten. Från 4000 rpm börjar lutningen att minska och en ganska jämn effekt väntar till strax över 5100 rpm. Därefter sjunker effekten på grund av kamaxlarnas utformning och avgasturbons kapacitet.

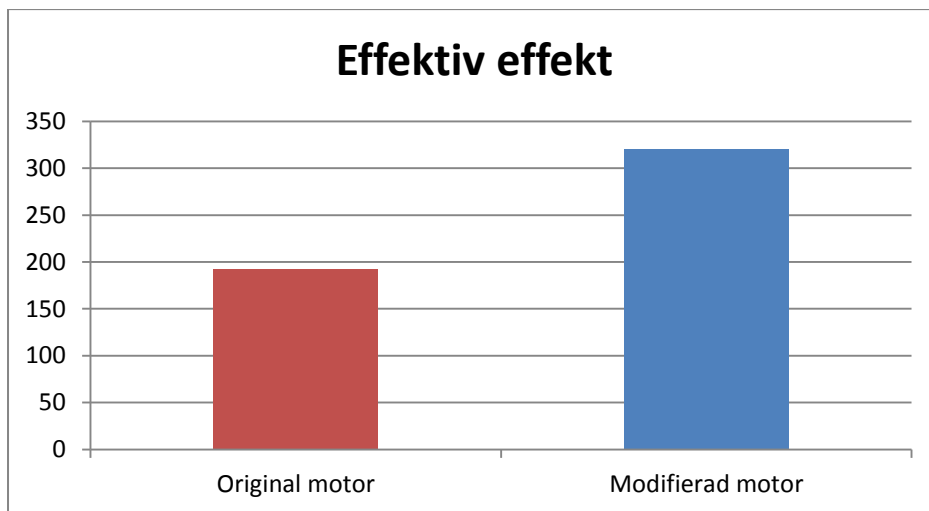
Modifierade motorns vridmomentsskurva, övre blå kurva.

Här kan den största skillnaden ses, vridmomentet gör en kraftig stigning på grund av det höjda insugstrycket, och de uppgraderade vevstakarna gör det möjligt att köra med ett högt insugstryck på lågt varvtal. Det resulterar i ett högt medeltryck och således högt vridmoment.

När varvtalet ökar förkortas ventilernas öppningstider och vridmomentet och förmågan att uträtta arbete minskar, det resulterar i att även effekten minskar.

Mer om kamaxlarnas och turbons funktion och karakteristik återfinns under kapitel avgasturbo 2.4.2. och kamaxlar 2.4.3.

3.2. Effektmål



Figur 6. Maximal effektiv effekt före och efter modifiering (egna mätningar)

Målet med motoroptimeringen var att höja den effektiva effekten till mellan 300hk och 350hk.

Figur 5 visar bromsbänkstestet där effekten och vridmoment mättes på hjulen, avläsningar ur denna figur ligger till grund för figur 6.

Då överföringsförluster finns mellan hjulen och vevaxeln kan de inte försummas utan har uppskattats till 12 %. Förlusterna är friktion i växellåda och drivknutar vilket ligger är avgränsat i arbetet.

Den högsta effekten enligt figur 5 är på den modifierade motorn 287 hk vid 4700rpm vilket med 12 % förluster ger 321 hk (236 kW) på vevaxeln.

Målet för motoroptimeringen i avseende för effekt anses därmed vara uppfyllt.

3.2.1. Effektivt medeltryck

En höjning av effekt och vridmoments får till följd att motorns medeltryck ökar.

Genom effektformeln under rubriken 2.1. Effektmål, kan ökningen av det effektiva medeltrycket (p_{me}) beräknas.

Effektformeln

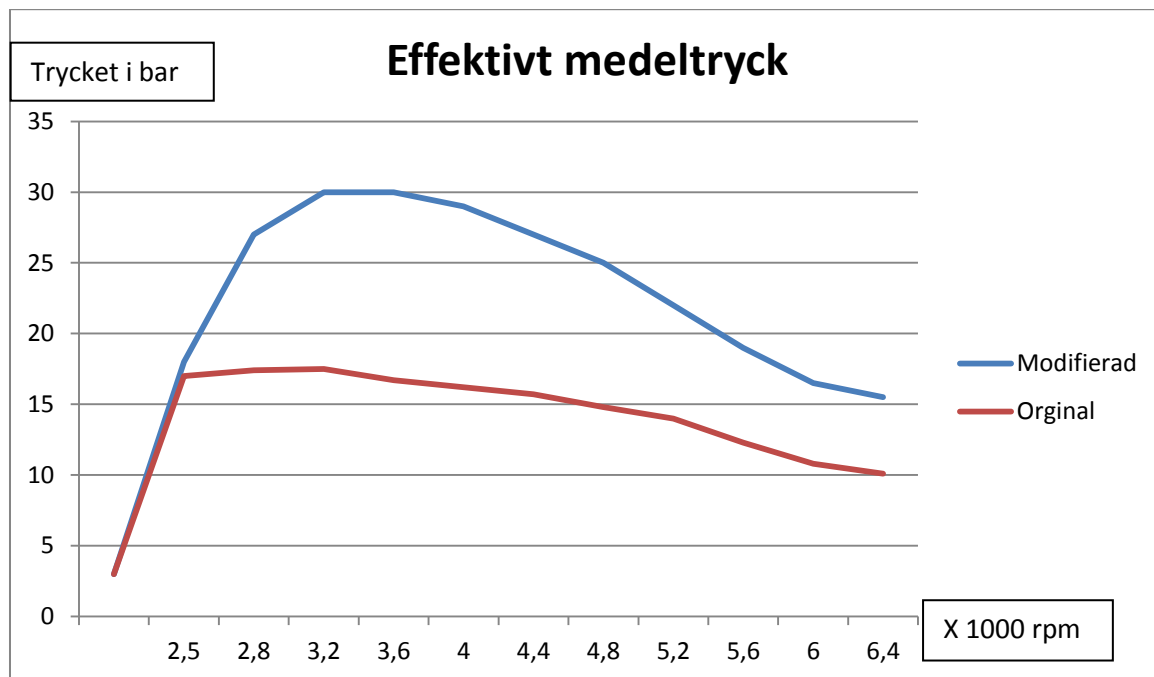
$$p_{me} = \frac{Pe}{\frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot S \cdot z \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{1}{i}}$$

Insättning av värden i effektformeln

Den effektiva effekten (Pe) är tagen från figur 5 och insatt i formeln ovan. Data om motorn återfinns i Bilaga 1.

	Originalmotor	Modifierad motor
Varvtal, n	2000 - 6500 rpm	2000 - 6500 rpm
Effektiva effekten, Pe	Värden från figur 5	Värden från figur 5
Cylinderdiameter, D	0,083 m	0,083 m
Antal cylindrar, z	5	5
Arbetscykler, i	2	2
Slaglängd, S	0,09 m	0,09 m

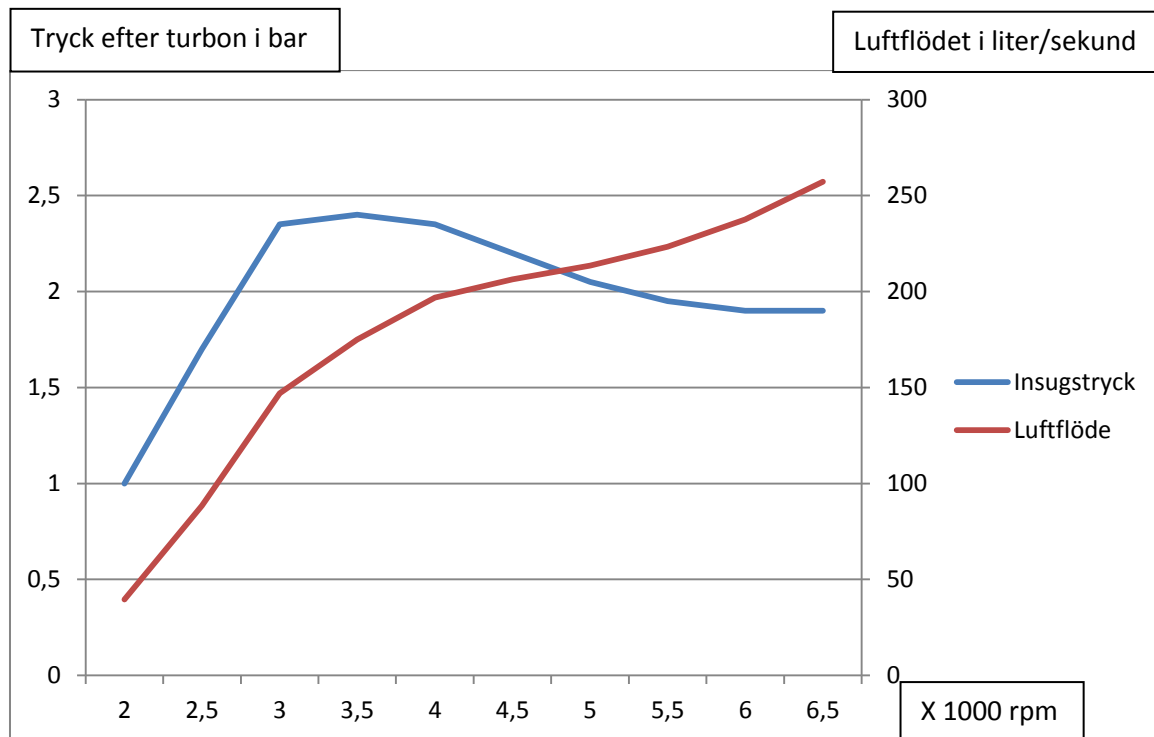
Effektivt medeltryck före och efter modifiering



Figur 7. Effektivt medeltryck före och efter modifiering (egna beräkningar)

Figur 7 beskriver förhållandet mellan det effektiva medeltrycket och motorns varvtal. Jämförs detta med figur 5 framgår det att motorns medeltryck och vridmoment är direkt proportionella mot varandra. Vid 2500 rpm börjar turbon arbeta för fullt och en väsentlig skillnad i medeltryck uppstår.

3.2.2. Motorns luftbehov och insugstryck



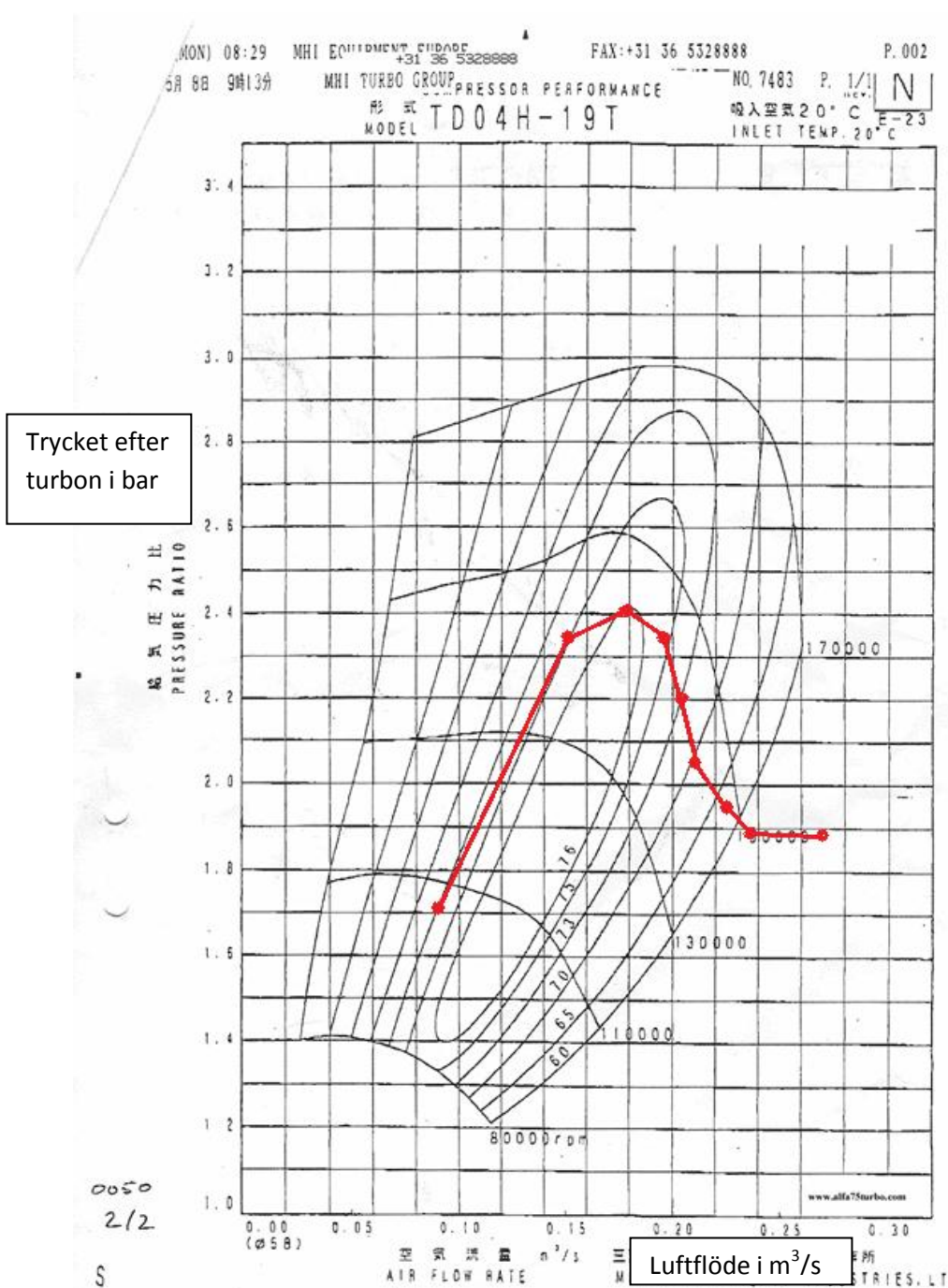
Figur 8. Förhållandet mellan insugstryck och luftflöde efter turbon (egna mätningar)

Figur 8 visar motorns beräknade luftbehov och uppmätt insugstryck efter turbon. Den röda kurvan beskriver luftflödet som motorn förbrukar per sekund, detta kallas även motorns luftbehov. Den blå kurvan beskriver turbons förmåga att hålla uppe trycket när luftbehovet ökar.

$$\dot{V} = \frac{V \cdot p \cdot \frac{n}{i}}{60}$$

Det teoretiska luftbehovet ($\dot{V}$) är beräknat genom att multiplicera motorns cylindervolym (V) med aktuellt insugstryck (p) vid ett varvtal (n).

3.2.3. Den nya turbons arbetsdiagram



Figur 9. Den nya turbons arbetsdiagram (Lucius 2011)

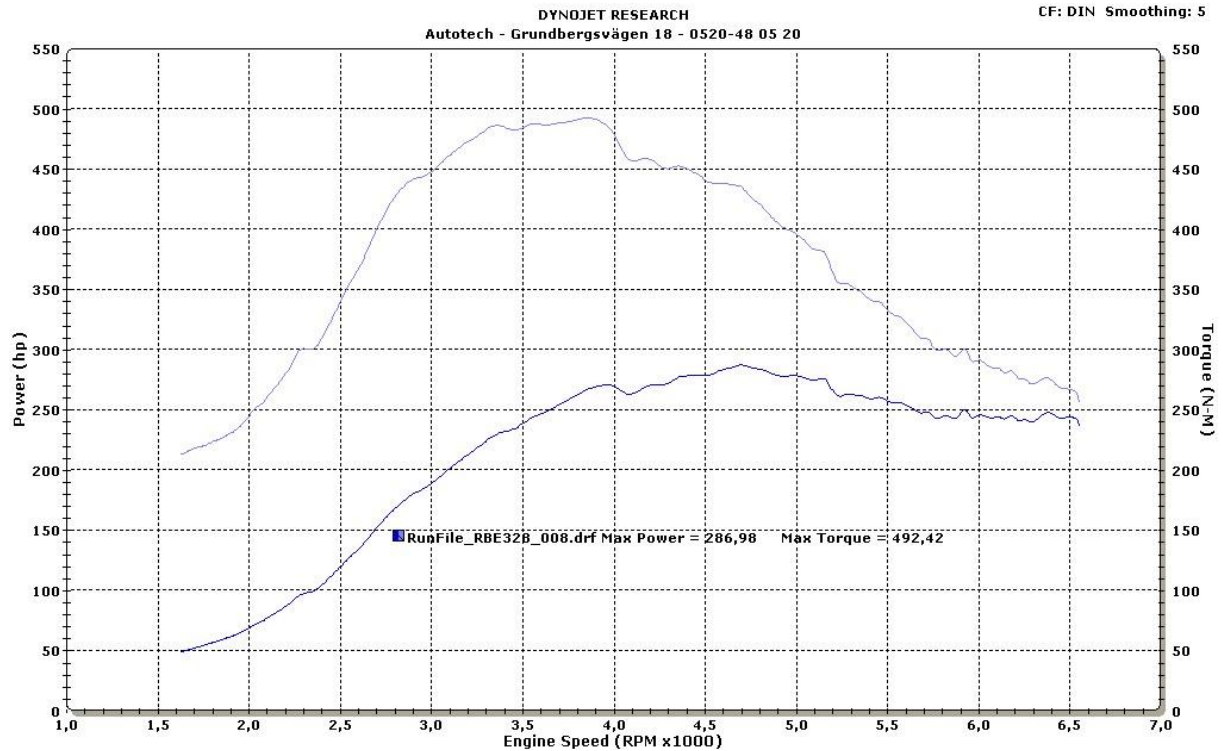
På figur 9 har turbons tryck och luftflöde efter turbon ritats in i turbons arbetsdiagram med hjälp av värden från figur 8. Luftflöde och tryck efter turbon är detsamma som motorns insugstryck och luftbehov.

Turbons arbetsdiagram visar turbons verkningsgrad

Enligt turbons arbetsdiagram, figur 9, arbetar turbon med högst verkningsgrad vid ett luftflöde på 150-200 liter per sekund, som på figur 8 kan ses som en bula med brantare stigning i intervallet 3000-4000 rpm.

4. Diskussion

4.1. Utvärdering effektmålet



Figur 10. Den modifierade motorns effektkurva (Autotech)

Syftet med motoroptimeringen var att höja effekten från original 193 ehk till 300-350 ehk.

Genom att studera figur 10 kan det konstateras att effektmålet är nått. Vridmomentet ökar kraftigt i början av varvtalsregistret och når sin topp vid ca 3700 rpm. Detta beroende på kamaxlarnas korta ventilöppningstider. Hade en kamaxel med längre ventilöppningstider används hade troligen vridmomentet inte ökat lika mycket i början, men varit en jämnare kurva och nått sitt maximum vid lite högre varvtal. Detta hade fått till följd av att effekten troligen hade ökat lite. Ett brett effektregister kan troligen ge bilen en bättre körförmåga och upplevas som starkare.

För att visa att högre effekt ges med högre vridmoment på högre varvtal kan man studera denna formel:

$$P = M \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

P står här för effekt, M för vridmoment och n för varvtalet i varv per minut.

Kan man få till ett högre vridmoment, M, med högre varvtal, n, så ökas också effekten, P.

4.2. Utvärdering driftsäkerheten

Driftsäkerhet är lite svårare att definiera än effektmålet, då det inte finns något bra sätt att mäta driftsäkerhet med. Efter intervjun med Autotech och diskussioner med erfarna personer inom motorsportsbranschen har modifieringar gjorts och komponenter bytts ut. Detta är ingen garanti att motorn kommer att hålla. Högre effekt och vridmoment innebär att större krafter påverkar motorn och ett större slitage över en längre tid kan antas. Vevstakarna som byttes ut till en kraftigare sort med H-profil medgav också att ett kraftigt vridmoment kunde tas ut vid låga varvtal. Att stadga upp motorblocket gör att cylinderväggarna rör sig mindre och ger mindre risk för sprickbildning i aluminiumet som blocket är gjutet av.

För att sammanfatta driftsäkerheten har de direkta påföljderna av en effekthöjning med avseende på driftsäkerhet minimerats i hög grad. Motorn har efter optimeringen körts i ca 1000 mil med varierad belastning utan driftstörningar.

5. Slutsats

Rapporten syftar till att ge en teoretisk förståelse för motoroptimering, där metoderna beskriver tillvägagångssätten och teorin bakom effekthöjning samt dess påverkan på driftsäkerheten. Resultatet ger en bild av vilken effekt metoderna har för motorns prestanda och karaktär.

Syftet med motoroptimeringen var att höja effekten från original 193 ehk till 300-350 ehk. Efter optimeringen producerar motorn 321 ehk och det kan konstateras att effektmålet är nått.

För att öka effekten har motorns effektiva medeltryck (pme) höjts som metod och resultat kapitlet behandlar, detta visar på att en fungerande metod för effekthöjning har använts.

Motorn har genomgått ändringar och modifieringar för att driftsäkerheten inte ska försämrast. Genom att motorn har körts hårt och i varierad belastning under en längre tid (total sträcka 10000 km) utan driftstörningar eller försämradeffekt. Målet med ökad effekt och bibehållen driftsäkerhet antas därför vara uppnådd.

För att öka effekten på fartyg används likande metoder som i detta arbete. Grunden för effekthöjning på fartygsmaskiner är också att öka motorns effektiva medeltryck (pme). Detta görs med hjälp av större avgasturbo, större bränslepumpar och injektorer samt med programmering av motorns elektroniska styrning.

Ett framtida examensarbete skulle kunna handla om hur en effekthöjning kan åstadkommas på en fartygsmotor som använder gas som bränsle och arbetar enligt Otto principen. Fartygsmaskiner med gasdrift ser ut att ta mer plats på världsmarknaden på grund av stigande bunkerpriser och ökade krav på avgasemissioner.

Bilaga 1, teknisk data om motorn innan modifiering

Motorbeteckning: B5254T

Effekt: 193hk

Vridmoment: 270Nm

Borr: 83mm

Slaglängd: 90mm

Kompressionsförhållande: 9,0:1

Total cylindervolym: 2,5L

Antal cylindrar: 5

Dubbla överliggande kamaxlar

Antal ventiler: 20

Turbo: tdh0413g

Bilaga 2, Intervju med Patrik Carvall, Autotech i Trollhättan

Beskrivning av Autotech

Autotech ligger i Trollhättan och har sedan starten 2001 sysslar med chiptrimning och motoroptimering. De utför även service på vanliga bilar med godkänd servicestämpel och fortsatt gällande garanti.

Autotech är ett ledande företag inom motortrimning och har byggt flera tävlingsbilar som Volvo C30 samt vunnit en stor effektmätningstävling med Ford Focus RS i Storbritannien. (Autotech 2011)

Intervju med Patrik Carvall, Autotech

- Lättaste sättet att höja effekten på en turbomotor?

Höja turbo trycket och bränslemängden elektroniskt genom s.k. mappning

- Om man vill ha ut mer effekt vad är nästa steg?

Byta ut turbon mot en större och därefter anpassa lambda värden efter det (stökiometrisk blandning)

- Om man byter ut turbon mot en större, finns det några problem med det?

1. Nya spridare behövs för att kunna leverera mer bränsle

2. Formel för spridarstorlek enligt Autotech: (Bosch)

t.ex.

$$\frac{340\text{cc} \cdot 5 \cdot 0.8}{5.1} = 266 \text{ hk vid 3 bars tryck}$$

3. Större bränslepump (tillräckligt på projektet)

4. Större luftmassa mätare (tillräckligt på projektet)

5. Bättre vevhus ventilation (Otilräcklig på projektet)

6. Större/öppnare vevhusventilation (optimalt "ventileras snabbare")

7. Större intercooler

8. Öppnare avgassystem

- Hur ska man välja rätt turbo?

Är väldigt svårt och omöjligt att beräkna sig fram till, görs genom erfarenhet och att prova sig fram. Storleken på turbon hänger ihop med cylindervolymen och avgasflödet.

På Autotech finns en fin bromsbänk där de kan se hur mycket små ändringar i tryckhöjning för turbon gör för effekten. Som ett exempel på en Honda S2000 där turbo trycket höjdes med 0.1 bar per test och detta gav 10 hk mer i effekt. Efter några höjningar gav 0.1 bars höjning istället 30 extra hk, vilket visade på att turbon nu jobbade inom sitt rätta arbetsområde, men vid ännu högre tryck gav 0,1bar 10 hk igen för att tillslut bli försumbart och bara pumpa varmluft.

Referenser

- Backlund, O (2011) förbränningsmotor, *Nationalencyklopedin*, <http://www.ne.se>, (2011-10-10)
- Stone, R (1999) *Introduction to Internal Combustion Engine*, 3e upplagan, London, Macmillian Press LTD
- Elovsson, S (1996) *Energiteknik Formler och tabeller*, 2a upplagan, Lund, Studentlitteratur
- Heywood, John B (1988) *Internal Combustion Engine Fundamentals*, USA, McGraw-Hill
- Autotech (2011) www.atechmotor.com (2011-09-30)
- Kuiken, K (2008) *Diesel engines* The Netherlands, Target Global Energy Training
- Johansson, K-E (1997) *Driftsäkerhet och underhåll*, Lund, Studentlitteratur
- Lucius, J (2011) Turbocharger Compressor Flow Maps for 3000GT and Stealth Owners, <http://www.stealth316.com/2-3s-compflowmaps.htm> (2011-10-14)
- Speed Alliance (2011) <http://www.speedalliance.com/catalog/product.php?productid=21384> (2011-10-14)
- Bosch Engineering (2011) http://www.bosch-motorsport.de/en-US/literature/en-US/InjectionValveE_DataSheet_enUS_T6748845579.pdf (2011-11-29)
- Polestar (2011) <http://www.polestar.se> (2011-12-01)
- PJ Speed Shop (2011) <http://www.pandjspeedshop.net/Services.htm> (2011-12-01)