



CHALMERS



Supercharging –

Ett sätt att få bättre motoreffekt med
luftöverladdning

Kandidatarbete i Maskinteknik

Josefine Johansson
Axel Jyrkäs
Benjamin Kaulén

Erik Pettersson
Fredrik Podgorski
Jakob Viklander

KANDIDATARBETE 2017:14

**Supercharging – Ett sätt att få bättre motoreffekt med
luftöverladdning**

Kandidatarbete i Maskinteknik

JOSEFINE JOHANSSON
AXEL JYRKÄS
BENJAMIN KAULÉN
ERIK PETTERSSON
FREDRIK PODGORSKI
JAKOB VIKLANDER

Institutionen för Tillämpad mekanik
Avdelningen för förbränning
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2017

Supercharging – Ett sätt att få bättre motoreffekt med luftöverladdning

Kandidatarbete i Maskinteknik

JOSEFINE JOHANSSON

AXEL JYRKÄS

BENJAMIN KAULÉN

ERIK PETTERSSON

FREDRIK PODGORSKI

JAKOB VIKLANDER

© JOSEFINE JOHANSSON, 2017

© AXEL JYRKÄS, 2017

© BENJAMIN KAULÉN, 2017

© ERIK PETTERSSON, 2017

© FREDRIK PODGORSKI, 2017

© JAKOB VIKLANDER, 2017

Kandidatarbete 2017:14

ISSN 1654-4676

Institutionen för Tillämpad mekanik

Avdelningen för förbränning

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon: +46 (0)31-772 1000

Omslag:

Turboladdare från en Volvo-dieselmotor, lånad från institutionen

Tryckt av Chalmers Reproservice AB

Göteborg, Sverige 2017

Förord

Denna rapport behandlar ett kandidatarbete som utförts under vårterminen årskurs tre, år 2017 på Chalmers tekniska högskola. Studenten får en kandidatexamen när arbetet är slutfört då detta är en avslutning på den treåriga grundutbildningen. Tre av studenterna läser Maskinteknik, två läser Automation och mekatronik och en läser Teknisk fysik. Alla program är femåriga och resulterar i en civilingenjörsexamen. Alla inriktningar omfattar 300 högskolepoäng varav kandidatarbetet är 15 högskolepoäng.

Projektgruppen vill rikta ett tack till vår handledare David Sedarsky, Mehmet Sarp Mamikoglu för hjälp med GT-Power och till examinatorn Sven B. Andersson.

Abstract

Supercharging is a very common approach used to increase engine power at a given cylinder volume. This requires increasing the amount of fuel and air flowing into the cylinder, which supercharging makes possible. There are different approaches used to generate this increased mass flow. This report covers turbocharging, which uses exhaust gases to create higher pressures and air flow to increase engine power. In summary, the report documents a method called downsizing, in which a smaller four-cylinder engine and a turbo will be compared to a larger, six-cylinder engine. The focus of the project is to model both engines in a simulation program called GT-Power and make a few simple calculations. This is to find out if it's possible to obtain a smaller engine with similar power as a bigger engine but with lower fuel consumption.

There are many different parameters that play an important part in increasing the power of an engine, among other the density of the air mixture and engine speed. Since the simulations demanded values of many parameters only available to engine manufacturers through testing on a physical model, it was difficult to get accurate results in GT-Power. In the calculations, values from GT-Power were used which made the result not completely accurate either. In our case, the power of the smaller engine increased by using a turbo which increased the density, and it gained approximately the same level of power as the engine with six cylinders, which was the goal of the project.

Keywords: Supercharging, Turbocharging, Downsizing, GT-Power, Engine power

Sammandrag

Överladdning är ett mycket vanligt tillvägagångssätt som används för att höja motoreffekten vid en given cylindervolym. Detta kräver en ökning av mängden luft och bränsle i cylindern, vilket överladdningen möjliggör. Det finns olika tillvägagångssätt för att uppnå detta ökade massflöde. I denna rapport nyttjas turboladdning som använder avgaser för att skapa högre tryck och luftflöde för att öka motoreffekten. Sammanfattningsvis behandlar rapporten en metod som kallas downsizing, där en mindre, fyr-cylindrig motor med turbo ska jämföras med en större sex-cylindrig motor. Fokus i projektet är att modellera båda motorerna i ett simuleringsprogram som kallas GT-Power samt göra enkla beräkningar. Detta för att undersöka om det är möjligt att erhålla en mindre motor med liknande effekt som en större, men med lägre bränsleförbrukning.

Det finns många olika parametrar som spelar roll för att effekten på en motor ska öka, bland annat densiteten på luftblandningen och varvtalet på motorn. Då simuleringarna krävde värden på många parametrar som endast är tillgängliga för motorproducenter via testning på fysiska modeller, var det svårt att få exakta resultat i GT-Power. I beräkningarna användes värden från GT-Power som gjorde att de inte heller blev exakta. I vårt fall ökades effekten på den mindre motorn med hjälp av turbon, och den fick ungefär lika hög effekt som motorn med sex cylindrar, vilket eftersträvades.

Nyckelord: Överladdning, Turbo, Kompressor, Downsizing, GT-Power, Motoreffekt

Ordlista

Backflow - Backflöde

Choking - Då flödet inte längre ökar trots ökande tryckskillnad

CI-motor - "Compression ignition motor", en motor som använder kompression för att antända luft-bränsleblandningen i cylindern.

Downsize/downsizing - Samlingsnamn för metoder att minska en motors storlek, vikt och slagvolym, men samtidigt höja prestanda och verkningsgrad.

GT-power - En motorsimuleringsmjukvara som används av flera motorproducenter och utvecklare i bilindustrin.

Intercooler - Ett kylsystem vanligen återfunnen mellan luftintaget och motorn i en bil.

Knackning - Okontrollerad självantändning av luft-bränsleblandningen i cylindern på grund av för högt tryck och temperatur.

Ottocykeln - En termodynamisk kretsprocess som är grunden för 4-taktsbensinmotorer.

SI-motor - "Spark ignition motor", en motor som använder tändstift för att antända luft-bränsleblandningen i cylindern.

Förkortningar

CAE - Computer-Aided-Engineering

mep - Mean effective pressure

bmep - Break mean effective pressure

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte	2
1.2	Mål	2
1.3	Avgränsningar	2
2	Teori	3
2.1	Luftöverladdning	3
2.2	Turbo	4
2.3	Kompressor	5
2.4	Twincharging	8
2.5	Dagens motorer med överladdning	10
2.6	Inblick i framtida möjligheter inom hybrid-turbo	10
2.7	Downsizing	12
2.8	Ottomotorn	12
2.8.1	Funktionen av en ottomotor	12
2.9	Bränsle	14
2.9.1	Bensin jämfört med andra bränslen	15
2.10	Indikerat arbete per cykel	15
2.11	Volymetrisk verkningsgrad	17
2.11.1	Finjusteringar av inlopp för optimering av motorn	17
2.12	Kompressionsförhållande	18
2.13	Laddluftkylning	19
2.14	Mean effective pressure	19
3	Metod	21
3.1	Simuleringar i GT-Power	21
3.1.1	Problematik vid användning av GT-Power	21
3.1.2	Mappning i GT-Power	22
3.1.3	Avgränsningar i GT-Power	22
3.2	Beräkningar	22
3.2.1	Volymetrisk effekt	23
3.2.2	Förhållande densitet, tryck och temperatur	23
4	Resultat	25
4.1	GT-Power	25
4.1.1	Förståelse av luftöverladdning	25
4.1.2	Skillnad mellan 6-cyl sugmotor och 4-cyl överladdad motor	27
4.2	Verifiering av teori och trender	29
4.3	Beräkningar	32
4.3.1	Densitet	32

4.3.2	Break mean effective pressure	33
5	Diskussion	35
5.1	GT-Power	35
5.1.1	Användande av programmet	35
5.1.2	Resultat ur GT-Power	36
5.2	Beräkningar	37
5.2.1	Avgränsningar	38
5.2.2	Övriga aspekter som påverkar resultatet	38
5.3	Vidareutveckling	39
6	Slutsats	41
	Referenser	42
	Bilagor	47
	Bränsle	47
	Bensin jämfört med andra bränslen	47
	Modeller från GT-Power	48

1 Inledning

Många nya fordon använder sig av mindre motorer för att öka verkningsgraden och minska bränsleförbrukningen, men detta kommer på bekostnad av en minskad motoreffekt samt sämre köregenskaper jämfört med större motorer [1]. Detta resulterar därför ofta i en kompromiss för att få önskvärda egenskaper. Även om verkningsgraden ökar och bränsleförbrukningen minskar måste fordonet fortfarande uppfylla säkerhetskrav och samtidigt bibehålla nog med kraft för önskvärd acceleration och maxhastighet.

Stora bilmotorer har önskvärda köregenskaper, men de har en hög bränsleförbrukning och når inte upp till de allt strängare utsläppskrav som ställs av EU och regeringar [2]. Detta leder till att bilutvecklingen strävar mot mindre utsläpp och bättre effektivitet, samtidigt som de vill bibehålla liknande prestanda som större motorer besitter. Elbilar anses vara ett alternativ till förbränningsmotorer, men på grund av dålig räckvidd som orsakas av låg lagringskapacitet hos batterier [3] så kommer förbränningsmotorer att fortsätta användas under en överskådlig framtid.

Därför finns det ett koncept som kallas downsizing som används för att reducera koldioxidutsläppen från en förbränningsmotor. Utöver det möjliggör downsizing en ökad verkningsgrad hos motorn vilket medför en lägre bränsleförbrukning, kräver en mindre motor, mindre material, och sparar på livscykelkostnader. Slagvolymen minskas för att minska motorns massa och för att öka verkningsgraden, samtidigt som luftöverladdning används för att bibehålla effekten och vridmomentet från den större motorn som den reducerade motorn ersätter. Resultatet blir en motor med liknande köregenskaper, men med minskad bränsleförbrukning och miljöpåverkan.

Överladdning är en beprövad metod för att förbättra motoreffekten och användes till exempel i formel 1 redan under sent 80-tal [4], överladdning kunde sedan med rätt inställningar och rätt konstruktion utvecklas för att användas i personbilar där den förbättrade både verkningsgraden och motoreffekten. Detta innebär att det är möjligt att få ut likvärdig effekt i en mindre motor med överladdning som i en större motor utan någon tillämpning av system med överladdning. På så sätt sparas både vikt och bränsle vilket är önskvärt ur miljösynpunkt.

Överladdning innebär att genom tillämpning av en kompressor i motorns luftsystem komprimera luften och på så sätt klämma in mer luft i cylindern. Därmed kan mer bränsle tillföras och fortfarande få en fullständig förbränning, vilket ger en möjlighet till både högre toppeffekt och större vridmoment vid låga varvtal.

1.1 Syfte

Syftet med arbetet är att utforska för- och nackdelar samt gränser och begränsningar med luftöverladdning i SI-motorer med avseende på motor-effekt, bränsleekonomi och verkningsgrad, samt dess applikationer inom downsizing av motorn. Vidare att undersöka inom vilka områden som störst förbättringar och vinster kan uppnås, samt vilka parametrar som i dessa sammanhang är viktigast och ger störst utdelning.

1.2 Mål

Att genom simulering undersöka begränsningarna med att efterlikna en större motors effekt-/momentkaraktistik med en mindre, luftöverladdad motor, s.k. downsizing.

För att lösa ovanstående delas detta in i delmål vilka listas nedan i punktform.

- Undersöka för- och nackdelar med olika överladdningssystem
- Beräkna verkningsgrader, förluster, potentiell effektökning och motoreffekt
- Undersök vilka parametrar som har störst inverkan
- Bygga upp en modell i simuleringsprogrammet GT-Power
- Utvärdera och analysera om det är lönt effektmässigt

1.3 Avgränsningar

Projektet fokuserar på bensindrivna förbränningsmotorer där en direktinsprutad motor utan luftöverladdningssystem väljs som kontrollmotor, för att sedan downsizas till en direktinsprutad motor med mindre slagvolym och med ett luftöverladdningssystem. Luftöverladdningssystemet som det främst handlar om är ett turbosystem.

Under projektet konstrueras inga fysiska modeller, alla system modelleras och simuleras i GT-Power. Dessa modeller bygger på och grundar sig i verkliga design och verkliga motorer. Dock görs en undersökning av egenskaper på fysiska föremål och deras uppbyggnad.

Endast enkla beräkningar och simuleringar utförs för att beräkna motorkarakteristiker, verkningsgrader och förluster då ingen tillgång till kraftfulla beräkningsverktyg utom GT-Power är möjlig. Beräkningarna innefattar främst termodynamiska beräkningar så som volymetrisk verkningsgrad samt ottocykeln och dess inverkan på termisk verkningsgrad.

Utöver detta är projektets budget begränsad till 2000 kr.

2 Teori

I detta avsnitt beskrivs teori om luftöverladdning och olika lösningar på det. Grunder om bensinmotorn och vissa beräkningar förklaras också.

2.1 Luftöverladdning

Luftöverladdning innefattar alla system och tekniker med avseende att öka luftdensiteten och därmed öka mängden syre som tillförs en förbränningsmotor [5]. Detta kan uppnås genom att öka lufttrycket med en kompressor eller att sänka luftens temperatur, luftöverladdning associeras dock oftast med den första metoden.¹

Luftöverladdning kan uppnås med pumpar, roots-kompressorer och centrifugalkompressorer (se kap. 2.3). Dessa kan drivas direkt via motorns vevaxel, med elektriska motorer eller med turbiner. Det vanligaste idag är användningen av motorns avgaser för att driva en turbin som i sin tur driver en centrifugalkompressor. Detta koncept föreslogs först av Auguste Rateau och är idag allmänt känt som turbo [5].

Inom dagens bilbransch används luftöverladdning i stor utsträckning och turbon är vanligast. Luftöverladdning används i både stora och små motorer, men framförallt i dieselmotorer i form av en turbo, se avsnitt 2.2. Även tyngre maskiner, båtmotorer och propellerdrivna flygplan är utrustade med turbo. Luftkompressorer är vanligare inom högprestanda-motorer, men turboladdare används flitigt även där.

¹Luftöverladdning föreslogs och patenterades av Gottlieb Daimler, men testades inte förrän 1878 när Dugald Clerk applicerade det på sin gasdrivna tvåtaktsmotor. Den första viktiga applikationen av luftöverladdning var i flygplansmotorer då de arbetar vid lågt omgivningstryck. Överladdningen gjorde så att motorn fick in lika mycket luft på hög höjd som vid marknivå, vilket ledde till att motorn gick jämnare i luften överlag. Luftöverladdning har även används flitigt inom racing och motorsport sedan Mercedes Benz introducerade det 1922.

2.2 Turbo

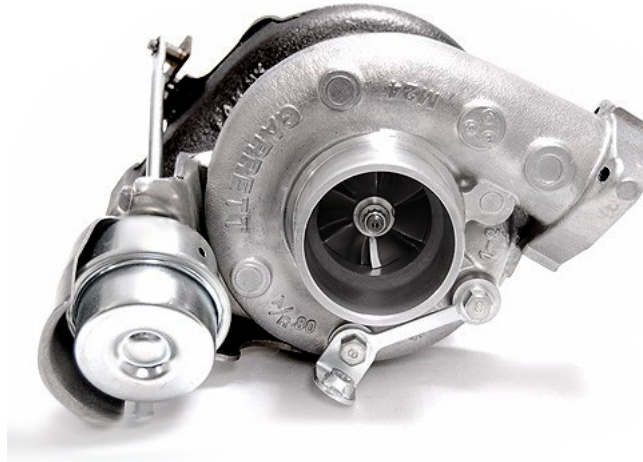
Turbosystem används för att öka effekten och verkningsgraden i en förbränningsmotor [7]. Turboaggregatet fungerar som sådant att när varma avgaser lämnar motorn med högt flöde börjar dessa driva ett turbinhjul. Detta driver i sin tur via en axel ett kompressorhjul på andra sidan av turbon. Kompressorhjulet pressar där samman den inkommande luften och skickar in denna i förbränningsrummet. Då är det möjligt att mata in mer luft i cylindern kan även mer bränsle matas in, vilket ger en större explosion och mer effekt.²

Till följd av luftkompressionen och den ökade bränslemängden vid förbränningen uppstår en högre värmeutveckling i en turboladdad motor. Detta är ett problem då för hög motortemperatur resulterar i knackning, det vill säga att bränslet självantänder i cylindern vilket direkt skadar motorn och även leder till stora effektförluster. För att förhindra detta används ett kylsystem för att kyla luften efter kompressionen, se avsnitt 2.13. Ett annat problem med värmen är att turbon måste kylas för att undvika haveri. Då turbon arbetar vid väldigt höga varvtal, ibland över 200 000 varv/minut, måste glidlager smorda med olja användas då inga kullager eller rullager kan hantera så höga varvtal. Vid för hög temperatur kan därför glidlageroljan börja koka med haveri som följd [6].

En annan nackdel med turbo är den fördröjning som uppstår innan turbon kan leverera den extra effekten, så kallat turbolagg, vilket inte är ett problem vid användandet av en motordriven kompressor [8]. Fördröjningen är en följd av att turbinhjulet som drivs av avgaserna måste varvas upp för att kompressorhjulet i andra änden skall kunna komprimera luft. Vid lågt motorvarvtal är avgasflödet för lågt för att kunna driva turbinhjulet ordentligt och därför dröjer det en liten stund innan turbon kan leverera den extra effekten.

Teoretiskt sätt kan en turbo leverera väldigt höga tryck och därmed väldigt hög effekt. Detta ställer dock väldigt höga krav på komponenterna i både turbo och motor och livslängden minskar drastiskt. För att motverka detta har idag de flesta turbos ett system för att släppa ut luft om trycket blir för högt. Detta görs oftast i form av en ventil, vanligen kallad wastegate [9].

²Turbon patenterades 1905 av den schweiziske ingenjören Alfred Büchi [6]. Det dröjde dock till 1920-talet innan turbon började användas i dieselfartyg och lokomotiv. Turbo var till en början främst ett system som användes i diesellastbilar då dieselmotorer klarar av att arbeta under ett högre tryck och det dröjde till 1960-talet innan turbon började användas även i bensindrivna personbilar.



Figur 1: Personbilsturbo, utrustad med wastegate, i vilken avgaserna driver en turbin som i sin tur driver en kompressor som pressar in luft till cylinder. Detta tar tillvara på en del av avgasernas energi som annars går förlorad. Tack vare att den drivs av ett gasflöde och inte mekaniskt kan mycket höga varvtal uppnås, vilket ökar kompressionens effektivitet. Från [10].

2.3 Kompressor

Till skillnad från turbosystem som drivs av avgaserna drivs kompressorn direkt från vevaxeln. Detta leder till att motorn tappar kraft, eller snarare att kompressorn stjälar lite kraft av motorn för att drivas redan i ett tidigt skede. Men eftersom lufttillflödet blir större och därmed tillför mer syre per volym luft är det möjligt att mata in mer bränsle vilket i slutändan ger mer kraft ut.

Kompressorn har sedan den uppfanns funnits i en mängd olika varianter, men tre versioner har överlevt med tiden.

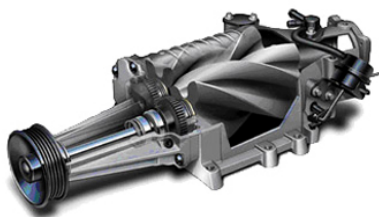
- Roots kompressor
- Twin-screw kompressor
- Centrifugal kompressor

Roots-kompressor, vilken fått sitt namn från uppfinnarbröderna Philander och Francis Roots, är den äldsta typen av kompressor och patenterades till en början för att ventilerade gruvor [11]. Roots-kompressorn fungerar genom förskjutningsprincipen där luften komprimeras med hjälp av två motsatt roterande rotor. Dessa kompressorer arbetar snarare som en luftpump än en kompressor [12] eftersom luften inte komprimeras inuti Roots-kompressorn,

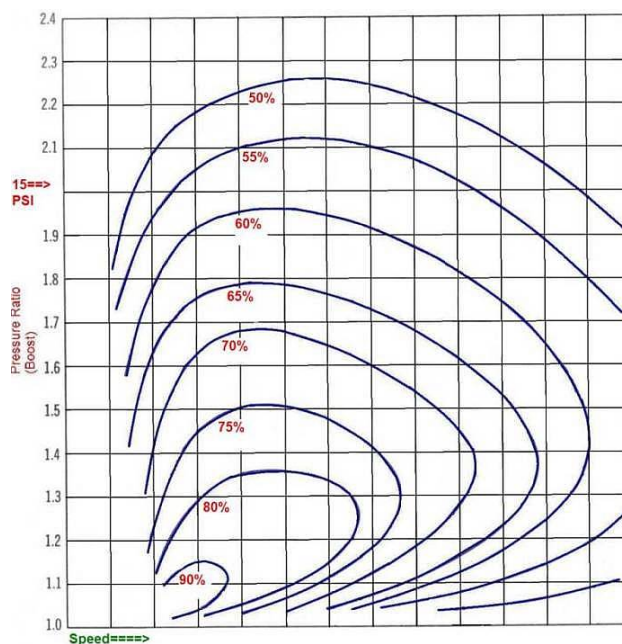
den tvingas in i inloppsgrenröret och komprimeras där när mer luft pumpas in.

På grund av sin storlek är ofta Roots-kompressorn monterad ovanpå motorn. Monteringsplatsen är också en av anledningarna till att Roots fortfarande används, trots att den har den lägsta effektiviteten och levererar luft i små stötar istället för ett jämnt flöde är den populär bland hot rod entusiaster på grund av sitt ”spektakulära utseende”. Roots används även på grund av sin enkla design och sin drastiska kraftökning vid låga varvtal [12]. Detta eftersom rotorerna sluter tätt till skillnad från övriga kompressorer som inte komprimerar luften så mycket vid låga varvtal eftersom ett flöde då inte byggs upp vid lågt RPM.

Roots är också väldigt pålitliga och kräver lite underhåll under sin livstid[12]. Detta är anledningen till att Ford, GM, Mercedes och Jaguar fortfarande använder sig av Roots-kompressorer på vissa av sina högpresterande fordon.



(a) Roots-kompressor som består av två rotor med motsatt rotationsriktning. De fungerar som en luftpump som tvingar luften vidare in i inloppsgrenröret där den komprimeras. Konstruktionen gör att den fungerar bäst vid låga varvtal. Från [13].

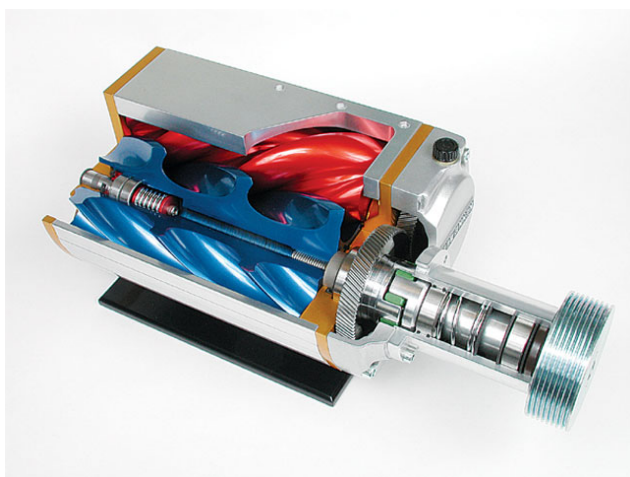


(b) Graf som beskriver Rootskompressorns verkningsgrad beroende på kompressorvarvtal och levererat överladdningstryck. Grafen visar tydligt att kompressorn är mest effektiv vid låga varvtal och trycknivåer. Från [14].

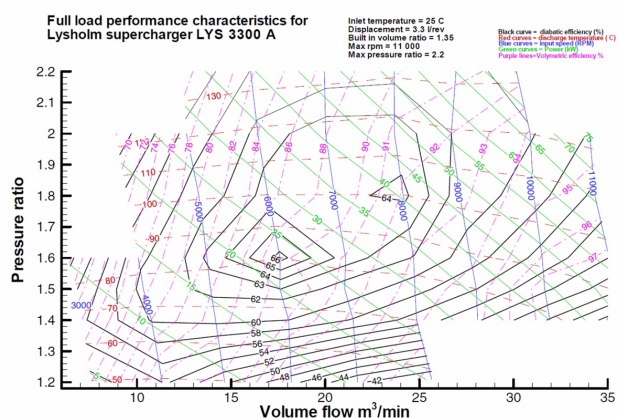
Figur 2: Rootskompressor

Twin-screw-kompressorn även kallad Lysholmkompressorn, efter sin upp-

finnare Alf Lysholm, använder sig på liknande sätt som Roots-kompressorn av två motsatt roterande axlar. Skillnaden är att rotorerna är koniska till formen vilket minskar storleken på luftfickorna som färdas från intaget till utblåset [15]. Till skillnad från Roots-kompressorn komprimeras luften alltså inuti Lysholmkompressorn, men eftersom rotorerna inte sluter tätt så krävs det att ett luftflöde byggs upp för optimal funktion. De minskade luftfickorna hos Lysholmkompressorn ger också ett bättre luftflöde in i motorn vilket ger ett högre flöde in i cylindern. De koniska rotorerna är problematiska att tillverka och detta gör att Lysholmkompressorer säljs till en högre kostnad än till exempel Roots. Annat som kan påverka negativt är att Lysholmskompressorn gör ett distinkt visslande ljud vid höga varvtal.



(a) Lysholmkompressorn består av 2 motsatt roterande rotorerna vilka komprimerar luften inuti kompressorn medans den skjuter denna framåt mot inloppsgrenröret. Denna konstruktion är effektivare än Roots-kompressorn, men kräver ett luftflöde och fungerar därför bäst vid medelhöga varvtal. Från [16].



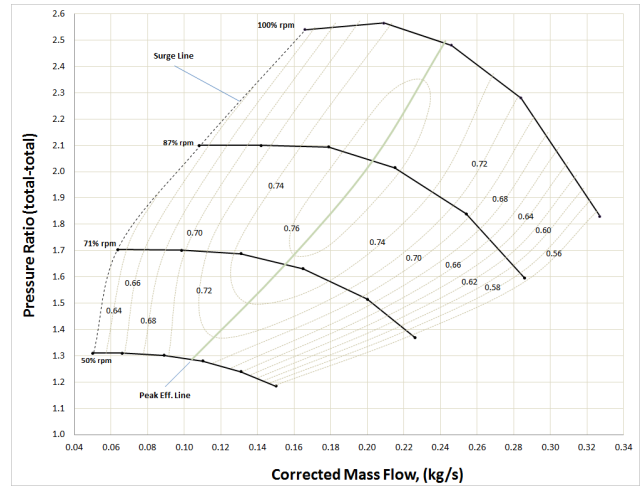
(b) Graf som visar en Twin-screw-kompressorsprestanda beroende på levererat överladdningstryck och luftflöde genom kompressorn. Ur grafen kan effekt, varvtal, tryck-luftstemperatur, adiabatisk verkningsgrad och volymetrisk verkningsgrad avläsas. Grafen visar att kompressorn är mest effektiv vid medelhögt tryck och luftflöde. Från [17].

Figur 3: Lysholmskompressor

Centrifugalkompressorn använder sig endast av en rotor istället för två. Denna liknar en turbo till stora delar och driver en invändig rotor som drar in luften i ett kompressorhus där luften komprimeras innan den skjuts in i cylindern. Av de tre överlevande typerna av kompressorer är centrifugalkompressorn den mest effektiva, men levererar lågt tryck vid låga varvtal. Den är även den lättaste och minst till storleken vilket gör att den kan monteras på nästan alla sorters motorer med små modifikation [18].



(a) Centrifugalkompressor fungerar som en turbo med undantaget att kraften kommer från vevaxeln istället för från avgaserna. Där vevaxeln driver en impeller som komprimerar luften innan den skickas in i cylindern. Från [19].



(b) Graf som visar en centrifugalkompressors verkningsgrad beroende på levererat överladdningstryck och luftmassflöde genom kompressorn. Ur grafen kan även gränsen då kompressor-surge uppstår avläsas. Grafen visar att kompressorn är mest effektiv i den höga hälften av varvtalsregistret. Från [20].

Figur 4: Centrifugalkompressor

2.4 Twincharging

Twincharging är ett koncept där både en motordriven kompressor och en avgasdriven turbo används. Skillnaden i kompressorn och turbons egenskaper möjliggör en kombination där de individuella nackdelarna hos luftöverladdarna kan minskas, och en jämnare kraftkurva över ett bredare intervall på motorvarvtal kan uppnås [21].

Turbon och kompressorn kan monteras antingen i serie eller parallellt, där seriekoppling är vanligast. I en seriekopplad twincharger sitter de två luftöverladdarna sekvensiellt och den första, antingen kompressorn eller turbon, matar den andra. Genom att låta en motordriven kompressor mata en turbo elimineras turbons uppspolingstid då turbon redan vid låga varvtal förses med tillräckligt högt tryck. När motorns avgaser är tillräckliga för att driva turbon kan kompressorn kopplas bort eller fortsätta att mata turbon.

Genom att fortsatt låta kompressorn mata turbon resulterar detta i att deras individuella kompressionsförhållanden multipliceras, vilket tillåter högre luftöverladdning som inte kan uppnås med andra twincharging-konfigurationer.

Nackdelen med denna typ av sekventiellkonfiguration är dock att även de två luftöverladdarnas verkningsgrader multipliceras. Då den motordriv-

na kompressorn ofta har en mycket lägre verkningsgrad än turbon resulterar detta i höga luft- och grenrörstemperaturer i motorn och ett kraftfullt kylsystem måste användas.

Vid parallellkoppling används vanligtvis en fördelningsventil för att tillåta en eller båda luftöverladdare att förse motorn med luft. Om båda överladdarna tillåts mata motorn, men utan att en fördelningsventil används, skulle den motordrivna kompressorn trycka luft bakvägen genom turbon då denna väg har mindre motstånd. Därför används ventilen för att ventilerar luft till turbon tills ingen risk för bakblås finns.

På grund av parallellkonfigurationens generellt mer komplexa struktur krävs vanligtvis dyra och komplexa regelsystem för att säkerställa en jämn utgående effekt.

De huvudsakliga nackdelarna med twincharging är systemets komplexitet och dyra komponenter. Utöver detta måste dyra elektriska och mekaniska regelsystem användas för att uppnå acceptabel responstid hos systemet, jämn effekt och tillräcklig effekttökning.

Till följd av den ökade komplexiteten och kostnaden med twincharging jämfört med andra luftöverladdningssystem används det sällan för kommersiellt bruk, men ofta inom racing och motorsport.³

Den kanske mest välkända applikationen för kommersiellt bruk är Volkswagens 1.4 TSI motor som används flitigt inom VW Group och använder sig av både en turbo och en motordriven kompressor [22]. Även Volvo Cars använder sig av twincharging i sina T6- och T8-motorer samt även i sina Polestarmodeller [23].

Förutom ovan nämnda exempel är twincharging ovanligt på den kommersiella marknaden då kostnaden och komplexiteten med twincharging är för stor och efterfrågan samt behovet av fördelarna för litet.

³Twincharging introducerades av Lancia 1985 i deras Delta S4 rallybil och i den vägglagliga versionen Delta S4 Stradale. Nissan adopterade konceptet tidigt och använde det i sin March Super Turbo. Utöver detta finns det ett flertal bilföretag som utvecklat och släppt twincharging-modifieringskit till vissa av sina bilmodeller däribland, Subaru, Toyota, Ford och Mini Cooper.

2.5 Dagens motorer med överladdning

På 1980-talet var en turboladdad motor något av det mest eftertraktade som kunde sitta i en personbil, laddtrycket höjdes för att få ut fler hästkrafter [24]. Att bränsleförbrukningen höjdes markant eller att risken för haveri ökade var inget som togs speciellt stor hänsyn till, det var den höga effekten som huvudsakligen var det slutgiltiga målet med turbon. Anledningen till att risken för haveri ökade var att resterande komponenter i motorn inte var anpassade till det höga tryck som byggs upp i en turboladdad motor [25]. Fördelar som minskade kompressionsförluster utnyttjades inte och med det ökade trycket blev knackning en risk. Det ökade därmed endast effekten vilket gjorde att man förbrukade mer bränsle per distans, detta eftersom insprutningen ökades för att uppnå rätt luft/bränsle-blandning.

Idag används turbon inte bara som ett prestationsbaserat alternativ utan också som ett ekonomiskt alternativ för att minska utsläpp. Särskilt fördelaktig är turbo-tekniken i små bilar där större motorer inte får plats. De problem som tidigare plågat turbomotorer; tillförlitlighet, turbolagg och höjd bränsleförbrukning kan nu elimineras med nya tekniker. Detta kan ske genom olika strategier så som flerstegsturbo eller twincharging se avsnitt 2.4 där en motordriven kompressor kompletterar turbon. Detta sker emellertid på bekostnad av ökad komplexitet och kostnad.

Framtiden ser ljus ut för turbon. Utvecklingen går framåt och framtida turbokompressorer kommer att öka i effektivitet och förbättras i mottaglighet. Det möjliggör ytterligare minskning av bränsleförbrukningen och CO₂-utsläpp [26].

Detta kan göras genom användning av variable geometry turbocharger vilken ändrar vinkeln på turbinbladen för att anpassa sig efter avgasflödet. Vid lågt avgasflöde minskas motståndet för att undvika turbolagg, vid högt avgasflöde ökas motståndet för att utnyttja flödet optimalt [27].

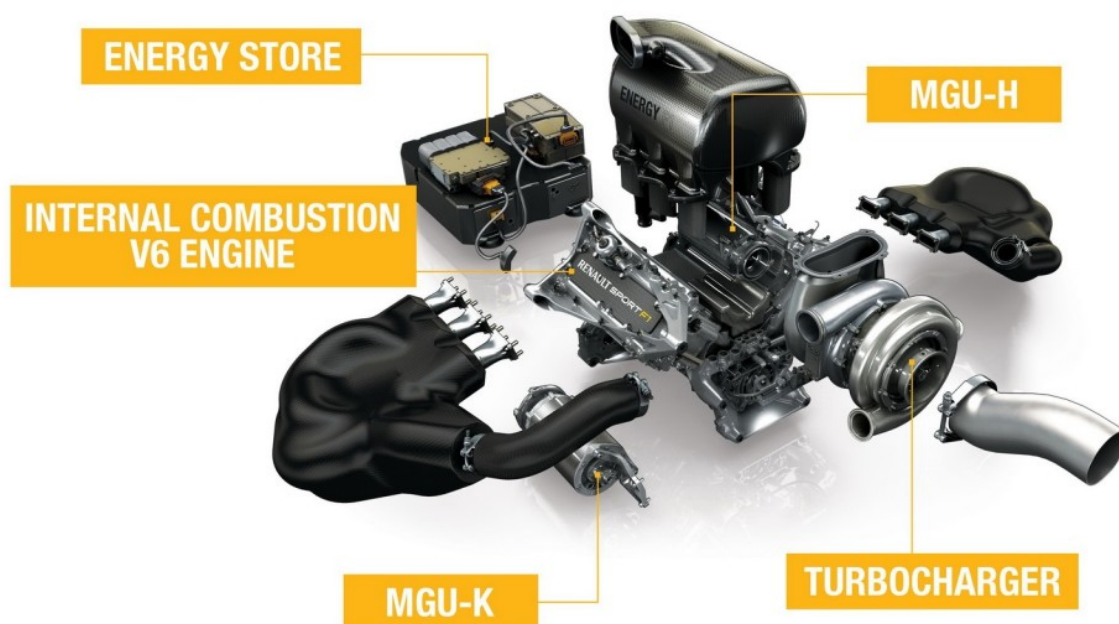
Det finns även planer att elektrifiera turbon som kan bidra till förbättrad prestanda och effektivitet genom båda aspekterna av en hybriddrivlina [28].

2.6 Inblick i framtida möjligheter inom hybrid-turbo

Formel 1 har givit möjlighet till att utveckla ny teknik som senare blir användbar i personbilar tack vare den eviga strävan efter bättre prestanda inom sporten. Några exempel är vidareutveckling av skivbromsar [29] och sekventiella växellådor [30]. Stallen har, till skillnad från akademien, även stora finansiella möjligheter tack vare åskådarintäkter, sponsorer och att de är vinstdrivande företag, samt i vissa fall stöds av stora concerner. Detta möjliggör det höga utvecklingstempot.

Det senaste tillskottet i ny teknik kom 2014 när en ny generation av motorer introducerades [31]. Den gamla V8:an på 2,4 liter ersattes med en

1,6 liters turboladdad V6-hybrid, se figur 5. Hela enheten kan delas in i 5 huvuddelar: förbränningsmotor, turbo, MGU-H, MGU-K och batterier. MGU står för "motor generator unit" och tilläggen H och K står för "heat" respektive "kinetic". Tillsammans med batterierna utgör de ERS, energy recovery system.



Figur 5: Renaults formel 1-motor. Hela enheten delas in i 5 huvuddelar: 1,6 liters V6 förbränningsmotor, turbo, MGU-H, MGU-K och batterier. Från [32].

MGU-H är direkt kopplad till axeln som går genom turbinen och kompressorn i turbon och använder elektrisk energi från batterierna för att spinna upp turbon vid gaspådrag för att nästan helt eliminera turbolagget. I den aspekten liknar denna lösning twin-charger-lösningen, men MGU-H ersätter alltså kompressorn. När full effekt inte behövs används MGU-H för att ladda batterierna med energin från avgaserna som driver turbon.

MGU-K är den mer traditionella delen av hybriderna och laddar batterierna vid inbromsning för att använda den lagrade energin till att ge 160 extra hästkrafter till drivaxeln under ca 30 sekunder varje varv vid full gas.

Denna teknik skulle, möjligtvis i något förenklad form, kunna appliceras

i personbilar i framtiden. Volvo har redan påbörjat utvecklingen av ett sådant system för att minska bränsleförbrukningen i sina bilar [33].

2.7 Downsizing

Downsizing är ett begrepp som används då en motor skalas ner från en större volym till mindre volym, och att det exempelvis används någon form utav luftöverladdning för att på så sätt behålla samma prestanda i den lilla motorn som kunde erhållas av den större motorn från början [34]. Downsizing sker generellt enligt ovan, en nedskalning från en större motor till en mindre samtidigt som det tillämpas något system av luftöverladdning. Men downsizing innebär inte bara detta utan det står mer allmänt för att motorn skalas ner och till exempel effektivisera komponenter så att så att motorn blir effektivare, vilket är bra ur miljösynpunkt eftersom en effektivare motor drar mindre bränsle. De huvudsakliga aspekterna i begreppet downsizing syftar helt enkelt till att effektivisera motorn till att göra den mer effektiv ur både prestanda- och kostnadsaspekt. I vårt projekt kommer begreppet downsizing innebära att vi skalar ner volymen på en motor och tillämpar luftöverladdning för att bibehålla liknande prestanda fast i en mindre motor.

Prestandan erhålls genom att en kompressor komprimerar luft så en större mängd luft går att trycka in i cylindern vilket ger fler syremolekyler per volym och på så sätt kan även mer bensin tillsättas och därmed erhålls en bättre förbränning vilket i sin tur leder till en ökad effekt.

I ett större perspektiv skulle en mindre motor leda till en betydligt mindre miljöpåverkan under en bils livslängd då en lättare bil överlag också drar mindre bränsle per mil. Slås detta ihop med en minskad bränsleförbrukning för att en mindre motor har tillämpats ger detta en effekt som är än större och ett system som påverkar miljön mindre negativt.

2.8 Ottomotorn

Förbränningsmotorer utgör en stor del av motormarknaden, detta för att de är billiga att tillverka. Idag är överladdning vanligt i både ottomotorer och dieselmotorer. Skillnaden mellan motorerna är inte avsevärd utan de är väldigt lika på många sätt, dieselmotorn har bland annat högre förbränningstemperatur än bensinmotorn och kräver inget tändstift för att starta.

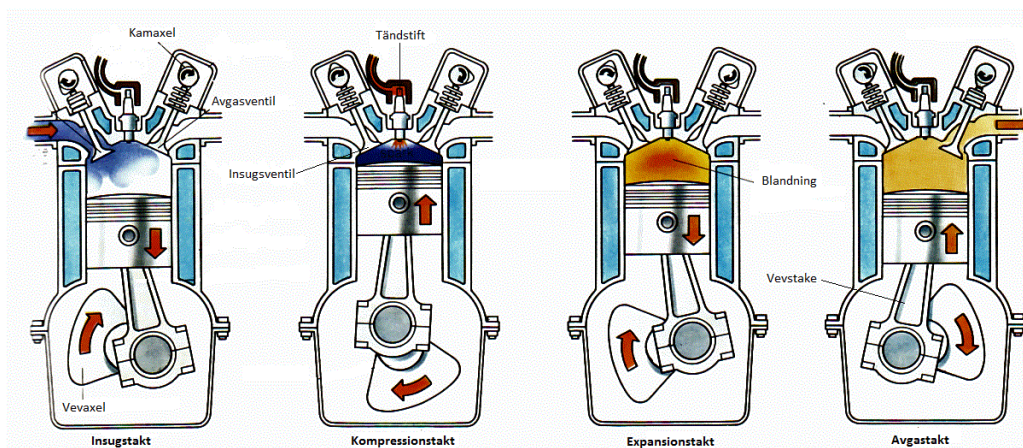
2.8.1 Funktionen av en ottomotor

En motor är en maskin som med hjälp av en intern process omvandlar bränsle (kemisk energi) till mekanisk energi vilket gör att fordonet kan röra på sig. Mer om bränsle finns i bilagan. Majoriteten av alla kolvmotorer

arbetar i fyra steg så kallade takter (4-taktsmotor), där varje takt motsvarar ett halvt varvs rotation av vevaxeln, där kolvens rörelse antingen går upp eller ner, och hela cykeln motsvarar alltså två varv [35, kap. 1, s. 10]. En ottomotor fungerar på följande vis:

Temperaturökningen som uppstår i en fyrtakts Otto-motor för med sig ett ökat tryck. Genom att utnyttja detta tryck kan energin som frigörs då bränsle förbränns användas. I motorn pressas en kolv ned på grund av tryckökningen, denna kolv driver en vevaxel via en vevstake. Vevaxeln omvandlar sedan kraften från motorn till mekanisk kraft som gör att bilen tar sig framåt.

Nedan är en djupare beskrivning av de fyra takterna.



Figur 6: Bild som beskriver de fyra olika takterna i en Ottomotor. Från [36].

Insugstakt

I denna takt sker insuget, detta sker då insugsventilen är öppen samtidigt som kolven rör sig nedåt i cylindern. Då sugas en luft- och bränsleblandning in genom ventilen på grund av ett undertryck som kolvens rörelse skapar.

Kompressionstakt

Efter att den första ventilen är stängd, rör sig kolven uppåt och skapar ett tryck som leder till kompression. Med hjälp av en gnista från tändstiftet strax innan kolven når toppen antänds blandningen.

Expansionstakt

Blandningen expanderas av antändningen och kolven accelereras nedåt. I denna takt utvinns arbete.

Avgastakt

När kolven nått botten öppnas avgasventilen och avgaser trycks ut. När alla avgaser är ute och kolven är tillbaka på toppen påbörjas nästa cykel i motorn.

Fördelen med en 4-takts motor i jämförelse med exempelvis en 2-takts motor är att den erhåller ett högre vridmoment vid lägre varvtal vilket är fördelaktigt ur bränsleekonomisk synpunkt [37]. Även att oljan på en 4-taktsmotor inte behöver tillsättas ner i cylindern utan bara transporteras runt i kanaler som smörjer vevaxeln och andra kritiska delar. Detta leder i sin tur till att ingen olja förbränns som den gör vid en 2-takts motor där olja tillsätts direkt i bensinen. Det finns också fördelar med 2-takts motorer och det är att de har ett högre vridmoment vid höga varvtal samt att det finns färre rörliga delar. Dessa fördelar väger dock inte upp nackdelarna med mer slitage i cylinderloppet och högre utsläpp på grund av oljan som tillsätts in i cylindern och förbränns, samt att avgaserna behöver forslas ut samtidigt som ny luft- och bränsleblandning tas in i cylindern. Mindre effektiv förbränning är också en nackdel med 2-taktsmotor eftersom förgasare används vilket inte ger en lika exakt fördelning av luft och bensen som en direktinsprutning på 4-takts motor ger [37].

2.9 Bränsle

Bensen är ett fossilt bränsle som tillverkas av råolja och har ett energivärde på 46,4 MJ/kg. För att få ut så mycket energi som möjligt ur bränslet vid förbränning krävs det ungefär 15 gånger så mycket luft som bensen. Samtidigt producerar 1 kg bensen 3 kg koldioxid [41]. Avgaserna från förbränningen blir vatten, koldioxid och partiklar. Bensen används för att extrahera lagrad energi, som, i idealfallet, endast producerar vatten och CO₂. Problemet med bensen är inte utsläppen i sig utan att den utvinns från råolja. Den CO₂ som frigörs från fossila bränslen ingår inte i den kortsiktiga koldioxidcykeln då bildandet av fossila bränslen är på en miljönårig skala. Förbränning av bensen leder därför till en nettoökning av CO₂ i atmosfären då mer CO₂ släpps ut än vad som binds i naturen.

Dagens bensen som finns på bensinstationer runt om i landet innehåller även några procent etanol, detta sänker energivärdet hos bränslet något då etanol har lägre energiinnehåll än bensen, men blandningen är bättre ur miljösynpunkt [42]. Detta då etanol är ett förnybart bränsle som går att utvinna och tillverka av växtmaterial. Etanol tillverkad av biologiska resurser

kallas bioetanol och är då tillverkad av förnyelsebara råvaror i hela kedjan. Detta gör att bioetanolen näst intill blir koldioxidneutral så länge hantlingskedjan i förädlingsprocessen också är det [43]. Därför är en minskad bensin/bränsleförbrukning önskvärt ur både kostnads- och miljösynpunkt.

2.9.1 Bensin jämfört med andra bränslen

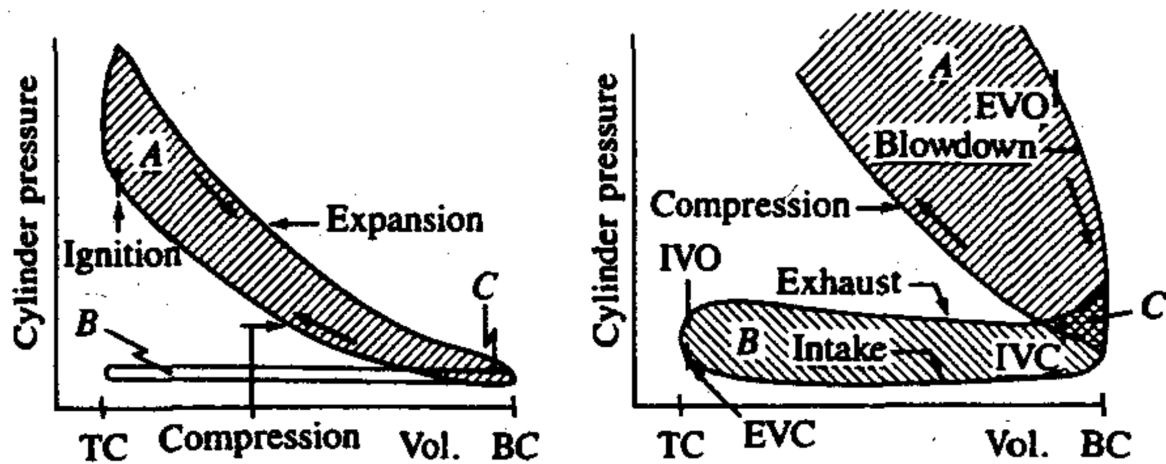
På dagens marknad finns många alternativa bränslen till bensin. Det vanligaste är diesel som likt bensin framställs ur råolja vilket sker genom en separationsprocess kallad fraktionerad destillation. Denna process separerar en blandning av dess kemiska beståndsdelar genom att utnyttja beståndsdelarnas olika kokpunkter för att förånga vissa medan andra förblir i vätskeform [44].

Diesel har en högre energidensitet än bensin på 48 MJ/kg och utöver det har dieselmotorer en högre verkningsgrad än bensinmotorer [45]. Detta resulterar i att mer mekanisk energi kan utvinnas ur diesel än ur bensin, vilket är fördelaktigt för både bränsleekonomi och miljön.

Ett annat vanligt drivmedel är etanol som blandas med bensin, vanligtvis 85 % etanol med 15 % bensin (därför namnet E85) [43]. Etanol har ett energivärde på 29,7 MJ/kg vilket är lägre än bensin, men etanol har ett högre oktantal vilket kan ge högre verkningsgrad hos motorn då högre kompression kan användas i motorn utan att riskera knockning. Dock resulterar den lägre energimängden i blandningen att bilar som använder sig av denna blandning kräver ca 20–30 % mer bränsle per mil jämfört med vanliga bensinbilar.

2.10 Indikerat arbete per cykel

Trycket för gasen inne i cylindern möjliggör beräkningar för indikerat arbete. Genom att ställa trycket i förhållande till volymen i cylindern erhålls ett pV -diagram. Nedan visas två diagram där de representeras av en motor som inte är överladdad respektive en som är överladdad.



Figur 7: pV -diagram för icke överladdad motor, till vänster, och överladdad motor, till höger. Det tekniska arbetet som uträttas under en cykel motsvaras av den inneslutna, ifyllda arean. Jämförelse av graferna visar att en motor med överladdning potentiellt sätt kan utföra ett större arbete. Figur 2-4 i Heywood [35, kap. 2, s. 47].

I figuren ovan speglas en tydlig skillnad mellan de två diagrammen. Diagrammet för motorn med överladdning innesluter en area som inte finns i lika stor utsträckning i den utan överladdning. Den lilla arean som visas hos motorn utan överladdning motsvarar pumparbetet som kolven uträttar under avgas- och insugstakterna. Det indikerade arbetet, per cylinder, beräknas genom att integrera runt kurvan, som ger en linjeintegral, i pV -diagrammet för de olika diagrammen.

$$W_{c,i} = \oint p dV \quad (1)$$

Vid beräkning av integralen ges tre olika areor: A, B och C. Vid addition av area A och C ges pumparbetet som beskriver arbetsöverföringen mellan kolven och cylindergaserna under insug-utblås cyklerna. Pumparbetet skiljer sig beroende på motorkonfigurationen. Pumparbetet kommer ske *till* cylindergasen om trycket vid insug är lägre än trycket vid utblås. Detta är fallet för motorer utan överladdning. För motorer med överladdning kommer pumparbetet ske *från* cylindergasen till kolven då trycket är högre vid insug än vid utblås [35, kap. 2, s. 46–49].

Det matematiska uttrycket för att relatera indikerat arbete per cykel till effekten per cylinder sker enligt

$$P_i = \frac{W_{c,i}N}{2}, \quad (2)$$

där P_i är indikerat arbete per cylinder och N är varvtalet. På grund av att en 4-taktsmotor används senare i beräkningarna är ekvationen dividerad med 2.

2.11 Volymetrisk verkningsgrad

Volymetrisk verkningsgrad är ett mått på effektiviteten hos en 4-taktsmotor. Motorns prestanda begränsas, i de flesta fall, av mängden luft som kan användas till förbränning av bränslet. Volymetrisk verkningsgrad kan därför tolkas som motorns förmåga att pumpa luft [35, kap. 2, s. 53–54]. Vid stökiometriska förhållanden, det vill säga vid optimalt förhållande mellan luft och bränsle, beräknas det teoretiska värdet på den volymetriska verkningsgraden enligt

$$\eta_v = \frac{2\dot{m}_a}{\rho_{a,i}V_dN}, \quad (3)$$

där \dot{m}_a är luftmassflödet in i cylindern, $\rho_{a,i}$ är luftdensiteten vid inloppet, N är vevaxelns varvfrekvens (varvtal) och V_d är cylinderns slagvolym. Det är även möjligt att sätta $m_a = 2\dot{m}_a/N$ och erhålla det ekvivalenta uttrycket

$$\eta_v = \frac{m_a}{\rho_{a,i}V_d}, \quad (4)$$

där m_a är luftmassan som flödar in i cylindern per cykel.

Luftdensiteten vid inloppet kan väljas i olika punkter beroende på om hela motorns pumpförmåga ska bestämmas, då atmosfärisk luftdensitet väljs, eller exempelvis inloppsgrenrörets och ventilernas pumpförmåga, då luftdensiteten i grenröret väljs. I rapporten kommer endast hela motorns pumpförmåga att behandlas eftersom endast den är relevant för projektets ändamål.

Som synes i samband (3) definieras den volymetriska verkningsgraden som kvoten mellan massflödet av luft in i cylindern och volymen av luft med densiteten vid inloppet (atmosfärsdensitet) som får plats i cylindern. Luftöverladdning ökar massflödet av luft jämfört med en sugmotor och därmed ökar motorns pumpförmåga. Detta visar sambandet mellan pumpförmågan och den faktiska prestandan hos motorn och förklarar varför volymetrisk verkningsgrad är ett mått på motorns prestanda. Eftersom volymetrisk verkningsgrad är ett dimensionslöst tal och anger hur väl motorn utnyttjar sin volym är det ett bra sätt att jämföra effektivitet mellan olika motorer.

2.11.1 Finjusteringar av inlopp för optimering av motorn

Vid första anblick verkar det som att det inte går att uppnå mer än 100% volymetrisk verkningsgrad i en sugmotor. Det är emellertid möjligt att

finjustera inställningarna på luftintaget för att utnyttja rörelsemängden hos luftflödet i inloppet. Detta gör dock inflödet mer varvtalsberoende.

Inloppsventilerna kan låtas vara öppna en längre stund, även förbi botendödläget på kolven, för att låta luftflödets rörelsemängd trycka in lite extra luft i cylindern innan ventilerna stängs. På så sätt uppnås mer än 100 % volymetrisk verkningsgrad.

Denna effekt fungerar dock bara i mitten av varvtalsområdet eftersom flödet är för lågt vid låga varvtal och att choking uppstår vid höga varvtal. När flödet är lågt har inte tillräckligt med rörelsemängd byggts upp för att uppnå den önskade effekten, flödet stannar då upp inne i cylindern och kolven börjar pressa ut luften genom inloppsventilerna. Detta kallas backflow och är nackdelen med att låta ventilerna vara öppna längre. Vid höga varvtal uppstår choking vilket gör att flödet inte är tillräckligt högt för att hinna fylla cylindern då kolven oscillerar så fort. Detta påverkas dock i mindre grad av ventilöppningstiderna och mer av till exempel rördiametrar.

Det finns alltså en avvägning som behöver göras mellan att öka den volymetriska verkningsgraden i mitten av varvtalsområdet, där oftast maximalt vridmoment uppnås, och att den volymetriska verkningsgraden minskar vid låga varvtal där den största delen av vägkörningen genomförs. Något som kan användas för att erhålla fördelarna och slippa nackdelarna är variabla ventilöppningstider, men det ökar å andra sidan komplexiteten på motorn.

I en överladdad motor behöver inte samma vikt läggas vid finjustering eftersom flödet ökas av kompressorn. I stället läggs fokus på att utforma avgasgrenrören så att baktrycket från turbon minimeras. Specifikt i turboladdade motorer ställs ventilerna dock in för att minimera backflow vid låga varvtal då överladdningstrycket inte byggts upp än.

2.12 Kompressionsförhållande

Kompressionsförhållande är förhållandet mellan cylinderns volym vid högsta och lägsta läge på kolven. Detta kan uttryckas som

$$r_c = \frac{V_d + V_c}{V_c}, \quad (5)$$

där V_d är slagvolymen och V_c är dödvolumen [35, kap. 2, s. 43].

Ett högt kompressionsförhållande är önskvärt på grund av att förbränningen genomförs mer effektivt, bränslets verkningsgrad η_f ökar.

En sugmotor är inställd på det högsta möjliga kompressionsförhållandet, under gränsen där motorn börjar knacka på grund av att bränslet självantänder från tryck- och temperaturökningen. Överladdas denna motor utan att ändra på några parametrar överskrider värdena för tryck och temperatur eftersom den ökade mängden luft i cylindern innebär ett högre utgångstryck. Därför behöver kompressionsförhållandet i motorn sänkas

så att det ligger under gränsen för knackning. Mängden energi som går åt till kompressionsarbetet, så kallat kompressionsförluster minskar då i en överladdad motor jämfört med en sugmotor. Kombinerat med den större mängden energi från luft- och bränsleblandningen ger detta både högre effekt och verkningsgrad till den överladdade motorn.

2.13 Laddluftkylning

I en överladdad förbränningsmotor används en kompressor för att komprimera insugsluften för att få en ökad motoreffekt. Vid kompressionen genereras värme vilket ökar temperaturen på luften [38]. Nackdelen med denna temperaturökning är att den även leder till ökad temperatur i motorn. Vid höga temperaturer i motorcylindrarna kan knackning uppstå.

En laddluftkylare, även kallat intercooler, är ett mekaniskt kylsystem som används för att kyla insugsluften i en överladdad förbränningsmotor. Luften leds genom kylaren som sitter monterad mellan insuget och kompressorn.

Kylaren sänker lufttemperaturen och ökar därmed luftdensiteten. Ökningen i densitet medför att mer syre per volymenhet luft kan tillföras motorn och därmed mer bränsle, således ökar motorns volymetriska verkningsgrad.

Nackdelen med en intercooler är att luftflödet hämmas något, men ökningen av verkningsgraden till följd av den sänkta lufttemperaturen är större än förlusten som kylaren skapar.

2.14 Mean effective pressure

Vridmomentet som genereras av en motor är beroende av hur stor slagvolym motorn har. Vid en jämförelse är det således komplicerat att jämföra två motorer som har olika slagvolym med avseende på vridmoment. En mer användbar parameter vid jämförelse av en motors prestanda är mean effective pressure, mep, som beskriver medeltrycket i cylindern under last och defineras enligt

$$\text{mep} = \frac{2P_i}{V_d N}, \quad (6)$$

där P är effekt per cylinder, se ekvation (2), V_d slagvolymen och N varvtalet. På grund av att en 4-taktsmotor analyseras, se avsnitt 2.8.1, måste en konstant införas i täljaren som beror på antalet varv per expansionstakt.

Ekvation (6) beror av vilken typ av effekt som används. Ekvation (2) beräknar den indikerade effekten. I många fall är break mean effective pressure, bmep, en mer användbar parameter. Relationen mellan effekten av en cylinder och vridmomentet är per definition $P = 2TN\pi$ vilket ger bmep

enligt

$$b_{mep} = \frac{4T\pi}{V_d}. \quad (7)$$

Anledningen till att använda mep eller b_{mep} var, som tidigare i avsnittet konstaterat, att ta fram ett normaliserat värde som kan möjliggöra en jämförelse mellan relativ motorprestanda. Ekvation (7) visar detta genom att relatera vridmomentet till slagvolymen.

3 Metod

För att på bästa sätt tydliggöra genomförandet av projektarbetet delades tillvägagångssättet upp två huvuddelar. Simuleringar och beräkningar.

3.1 Simuleringar i GT-Power

En kontrollmotor valdes och modellerades i GT-Power. Simuleringar och beräkningar utfördes mot kontrollmotorn likväl den framtagna downsizade motorn för att sedan jämföras och analyseras. Stor del av arbetet bestod av att lära sig GT-Power och bygga upp en rimlig modell med rätt inställningar på delar och motorns system så som turbon, kompressorn, tryck, kompressionsförhållanden osv.

GT-Power [39], utvecklat av Gamma Technologies, är en CAE-programvara med ett övergripande bibliotek vilket möjliggör simuleringar inom fysik som exempelvis flöden, värme, mekanik, elektronik, magnetism, kemi, och styr-system. Genom att använda de givna biblioteken är det möjligt att bygga precisa modeller av de flesta system inkluderat fordon, motorer, drivlinor, växellådor, generella drivlinor och mekaniska system, hydraulik med mera.

GT-Power är kompatibelt med CAD vilket gör att användaren inte behöver bygga upp sina system manuellt. Alltså är det möjligt att lägga in en CAD-modell i GT-Power och därmed diskretiserar programmet en modell utifrån CAD-filen vilket ger en modell med mer exakta parametervärden som till exempel rörlängder, ytfinheter och material. Självklart kan även dessa värden bli felaktiga och måste dubbelkollas då de annars kan påverka simuleringsresultat, men det är troligen fortfarande mer pålitligt och framförallt mer behändigt än att göra det manuellt.

Projektets syfte med GT-Power är att kunna bygga upp ett 4-cylindrigt överladdat system samt ett 6-cylindrigt icke överladdat system för att simulera dessa och förstå hur dessa fungerar samt kolla på begränsningar hos systemen. En jämförelse mellan de två ovanstående motorerna kommer att göras, detta för att se hur downsizing fungerar och om det är möjligt att få en liknande effekt från den 4-cylindriga motorn som från den 6-cylindriga motorn.

3.1.1 Problematik vid användning av GT-Power

Gruppens upplevelse av GT-Power är att simulationsmiljön är kraftfull och klarar lätt av de funktioner som behövdes i detta projekt. Det största problemet i projektet har varit att bygga upp grenrör och avgassystem, då det inte funnits CAD-modeller att använda utan uppbyggnaden har skett genom diskretisering. Detta har gjort att parametrar har behövts antas vilket gör modellen mindre realistisk.

Turbofunktionen i GT-Power är också svårhanterad om det inte finns rimliga mappar, se kapitel 3.1.2, till turbon och kompressorn. Detta blev ett problem då endast mappar från dieselmotorer fanns tillgängliga i GT-Power, när dessa sedan användes skalades de ner med en skalningsfaktor för att ge rimliga turbotryck för bensinmotorer. Detta ger dock en del problem då en dieselmotor arbetar på ett maximalt varvtal av cirka 5000 varv per minut, medan bensinmotorn kan arbeta på cirka 7000 varv per minut utan större problem vilket leder till att de höga varvtalen inte kommer med i den givna mappningen för dieselmappningen. Alltså kommer turbon att arbeta helt utan relevant eller faktisk data på alla varvtal över 5000 varv. Detta kan ha påverkat resultatet, men syftet med projektet har inte varit att ta fram exakta värden och modeller utan att hitta trender och de störst påverkande faktorerna vid överladdning. Därför används modellen ändå eftersom den inte behöver vara exakt för att påvisa detta.

3.1.2 Mappning i GT-Power

I GT-Power används approximationer i kompressorn och turbinen beroende på vilket massflöde. Trycket ut ur cylindern ges av ett visst varvtal till kompressor/turbinen. Dessa approximationer sätts upp i matriser vilka senare kommer att kallas för mappar. Mappning används för att underlätta för programvaran vid beräkning. Att ha givna värden för alla varvtal tar för mycket kapacitet därför skapas en mapp som sedan simuleringsprogramvaran avrundar till närmsta varvtal hos turbinerna.

3.1.3 Avgränsningar i GT-Power

Det finns några faktorer som inte har beaktats i modellerna och resultaten. Dessa kan påverka resultatet och även bidra till skillnader mellan simuleringar och teori. Dessa faktorer är:

- Parasitic load - Alla funktioner i motorn som tar energi från motorn för att förbättra prestandan. Exempel på detta är lager, pumpar och ventiler. En kompressordriven luftöverladdare skapar en ganska stor parasitic load i jämförelse med en turboladdare.
- Diskretiseringen av gren- och avgasrör ger stora differenser mot verkliga system då det är endast möjligt att anta längder på rören.
- Problematik att hitta rimliga mappar för bensinmotorer.

3.2 Beräkningar

De enkla beräkningarna som utförs i detta stycke handlar om den volymetriska effekten, samt förhållandet mellan densitet, tryck och temperatur i

motorn. Detta görs för att få en bättre förståelse om hur motorn fungerar teoretiskt.

3.2.1 Volymetrisk effekt

När effekten på en bensinmotor ska beräknas finns det några viktiga parametrar som avgör hur hög eller låg effekt som fås av motorn. I en 4-taktsmotor kan den volymetriska effekten beräknas per cylinder genom följande formel:

$$P = \frac{\eta_f \eta_v N V_d Q_{HV} \rho_{a,i} (F/A)}{2} \quad (8)$$

där η_f och η_v är den verkningsgraden för bränslet respektive volymetriska verkningsgraden, N varvtalet, V_d slagvolymen, Q_{HV} värmekonstant, $\rho_{a,i}$ densiteten, $\frac{F}{A}$ förhållande mellan bränsle och luft, för bensin är detta $\frac{1}{14,7}$, och dividerat med 2 då det är en 4-taktsmotor.

Om alla parametrar som inte går att ändra antas konstanta blir den volymetriska effekten förenklat enligt nedan:

$$P \propto N \rho_{a,i} \quad (9)$$

Det betyder alltså att om effekten på en motor ska öka måste antingen varvtalet eller densiteten öka, alternativt båda. Varvtalet ändras genom att spjällägesgivaren ändras. Vid jämförelse av de två olika motorerna kommer varvtalesregistret att vara samma för de bägge motorerna. Däremot är det svårare att öka densiteten på luftblandningen som sugas in i cylindrarna utan extra kraft utifrån. Det är där turbon kommer in. Genom att öka luftblandningen ökas också densiteten och därför blir effekten större när en motor överladdas. Luftfuktigheten beaktas också i beräkningarna och beror på temperaturen i luften. Luften har normalt sett minst 1 % luftfuktighet, dock kommer det i beräkningarna vara 0 % för enkelhetens skull.

3.2.2 Förhållande densitet, tryck och temperatur

Utifrån tidigare resonemang kring ekvation (9) är densiteten en parameter som har stor betydelse för den volymetriska effekten. Genom att använda ekvationen för den ideala gaslagen uttryckt i molär form, $pV = \frac{m}{M}RT$, och densitet, $\rho = \frac{m}{V}$, erhålls uttryck enligt nedan.

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (10)$$

där ρ motsvarar densitet, p motsvarar tryck, R motsvarar allmänna gaskonstanten och T motsvarar den absoluta temperaturen. Ekvationen beskriver hur densiteten av luften förhåller sig till trycket och temperaturen in till cylindern.

4 Resultat

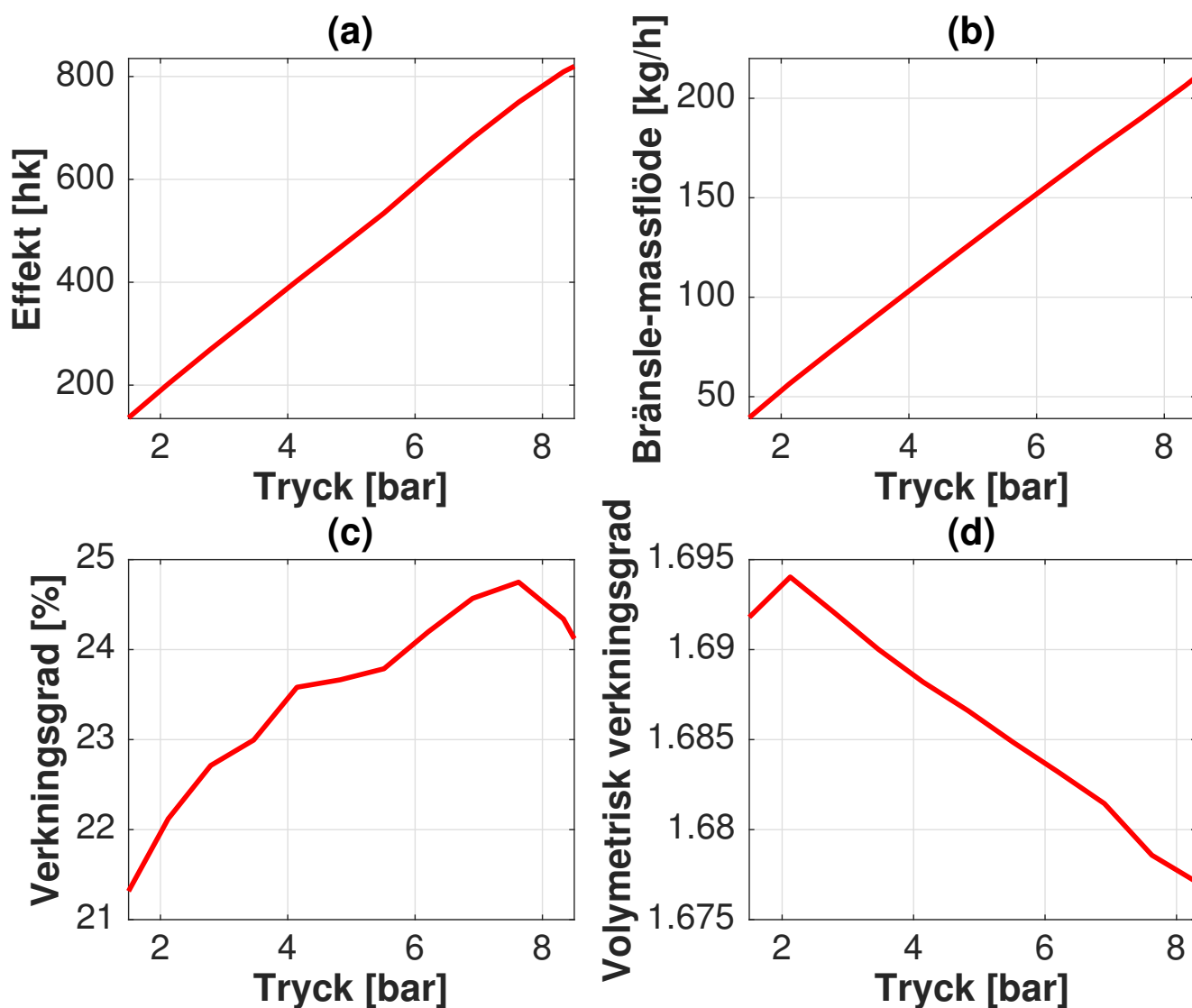
De resultat som erhållits från simuleringar och beräkningar presenteras i detta avsnitt.

4.1 GT-Power

GT-Power är simuleringsprogramvaran som använts under projektet. Nedan presenteras de resultat som simulerats fram. Modellerna som byggts kan ses i figurerna 13 och 14 i bilagan.

4.1.1 Förståelse av luftöverladdning

För att förstå hur luftöverladdning påverkar motorn simulerades en mätserie med ökande överladdning. Detta gjordes av en modell med fyra cylindrar och en turbo där trycket från turbon ökade under mätseriens gång. Denna mätserie plottades över trycket och parametrar som ansågs viktiga att titta på var verkningsgrad, effekt (hk), bränsleflöde och volymetrisk verkningsgrad (se figur 8).



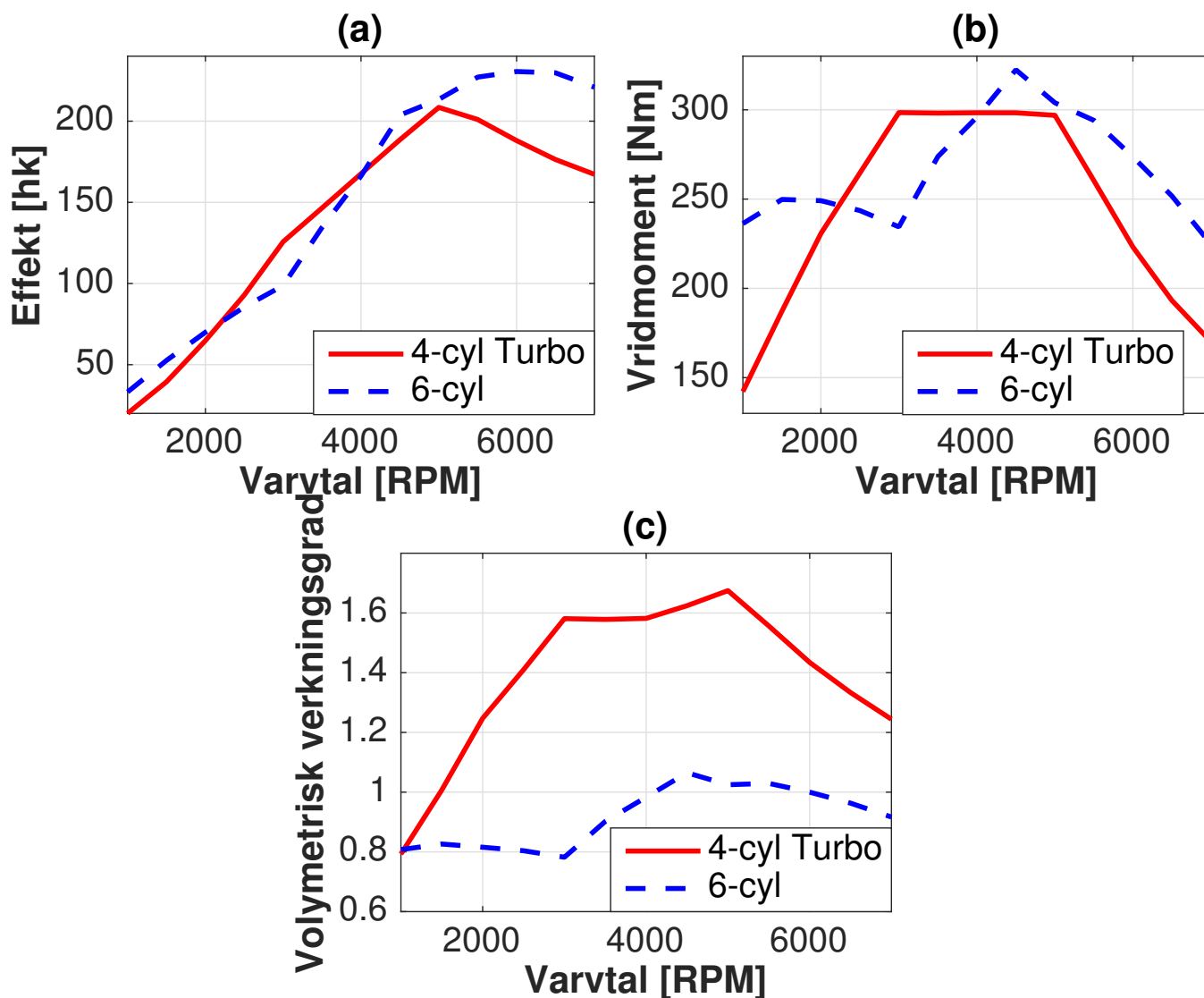
Figur 8: Graferna visar mätserier för en turboladdad motor för att påvisa hur olika turbostryck påverkar motorn. Det som betraktades var hur (a) effekten, (b) bränsleåtgången, (c) verkningsgraden och (d) den volymetriska verkningsgraden påverkades när dessa plottades över ett varierande tryck från turbon.

Bilderna visar att bränsleflödet och effekten är linjär med trycket in i cylindern. Detta beror på att ju mer luft som trycks in i cylindern desto mer bränsle sprutas in och detta är ett linjärt samband i luft/bränsleblandningen. Den volymetriska verkningsgraden peakar vid 2,2 bar för att sedan sjunka, detta beror på knackning hos systemet (se avsnitt 2.2). Verkningsgraden hos systemet ökar med trycket, fram till att någon parameter hamnar utanför fungerande nivåer. Detta finns det kunskap om sedan tidi-

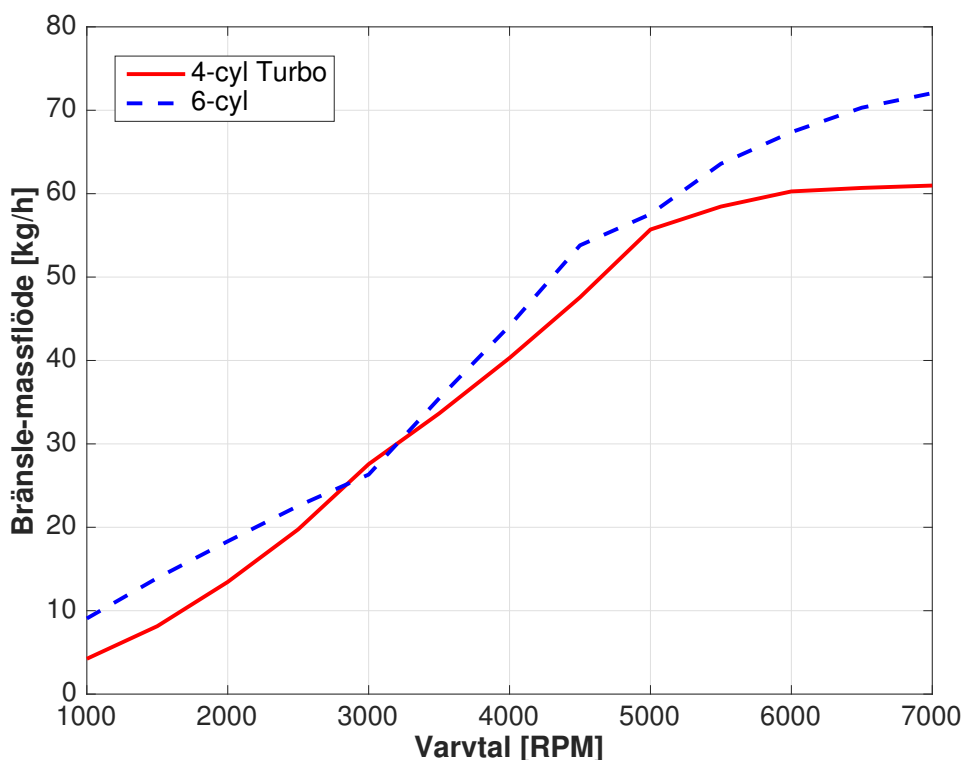
gare, men vid högt tryck in i cylindern krävs det ett sänkt kompressionsförhållande vilket sänker verkningsgraden. Sänkt kompressionsförhållande gör även att motorn blir beroende av laddtrycket tidigt vid låga varv [40].

4.1.2 Skillnad mellan 6-cyl sugmotor och 4-cyl överladdad motor

För att jämföra skillnaden mellan det turboladdade systemet och systemet utan turbo simulerades de båda modellerna och plottades med samma parametrar, se figur 9. Dessa användes sedan för att se hur parametrarna skiljde sig mellan de båda simuleringsmodellerna. Vid downsizing från en större motor är det möjligt att bibehålla kraften och vridmomentet med hjälp av att montera en turbo på den mindre motorn. Turbon ger även ett större varvtalsspektrum samt högre volymetrisk verkningsgrad.



Figur 9: Graferna visar hur (a) effekten, (b) vridmomentet och (c) den volymetriska verkningsgraden beror av varvtalet hos en 6-cylindrig sugmotor och en 4-cylindrig turbomotor.



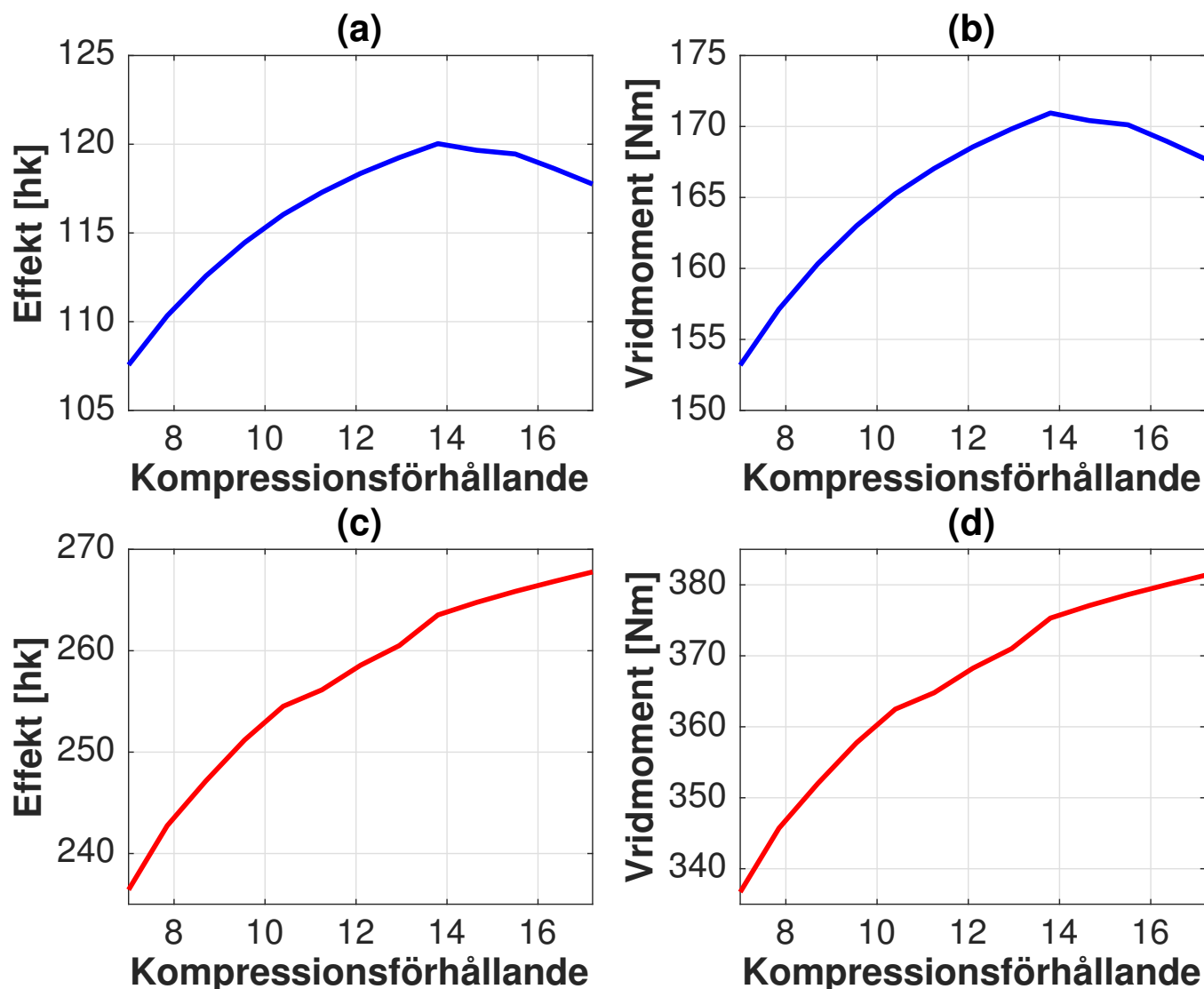
Figur 10: Graferna visar massflödet av bränsle över varvtal för en 4-cylindrig motor med turbo och en 6-cylindrig SI-motor. Mass flow rate visar hur många kilogram bränsle som går åt per timmes arbete, och ger en bra jämförelse om vilken motor som har bäst bränsleekonomi.

Det går här att observera i figur 10 hur stor bränslemassa per timme som förbrukas vid drift av motorerna. Här går det tydligt att se att bränsleförbrukningen hos motorn med turbo är lägre än motorn utan turbo vilket är positivt ur downsizing-synvinkel. Den minskade bränsleförbrukningen sker eftersom det går att öka bränslet till luft/bränsleblandningen tack vare turbon, men mängden insprutat bränsle kommer fortfarande inte upp i mängden som sprutas in i den 6-cylindriga motorn. Detta leder till att lägre bränsleförbrukning och ger en bättre bränsleekonomi. Detta utan att ta hänsyn till att den större motorn väger mer och därmed ytterligare ökar bränsleförbrukningen under körning eftersom en större last behöver accelereras.

4.2 Verifiering av teori och trender

Simuleringar utfördes för att undersöka huruvida teorin i avsnitt 2.12 stämmer i praktiken. I figur 11 finns resultatet från simuleringar som utfördes för att undersöka hur effekt och vridmoment varierar med kompressionsför-

hållandet då alla andra parametrar, inklusive varvtalet, var konstanta. En färdig modell av en 4-cylindrig, överladdad motor användes. Graf a och b simulerades med en motor utan överladdning och graf c och d simulerades med en motor med 1 bar överladdning.

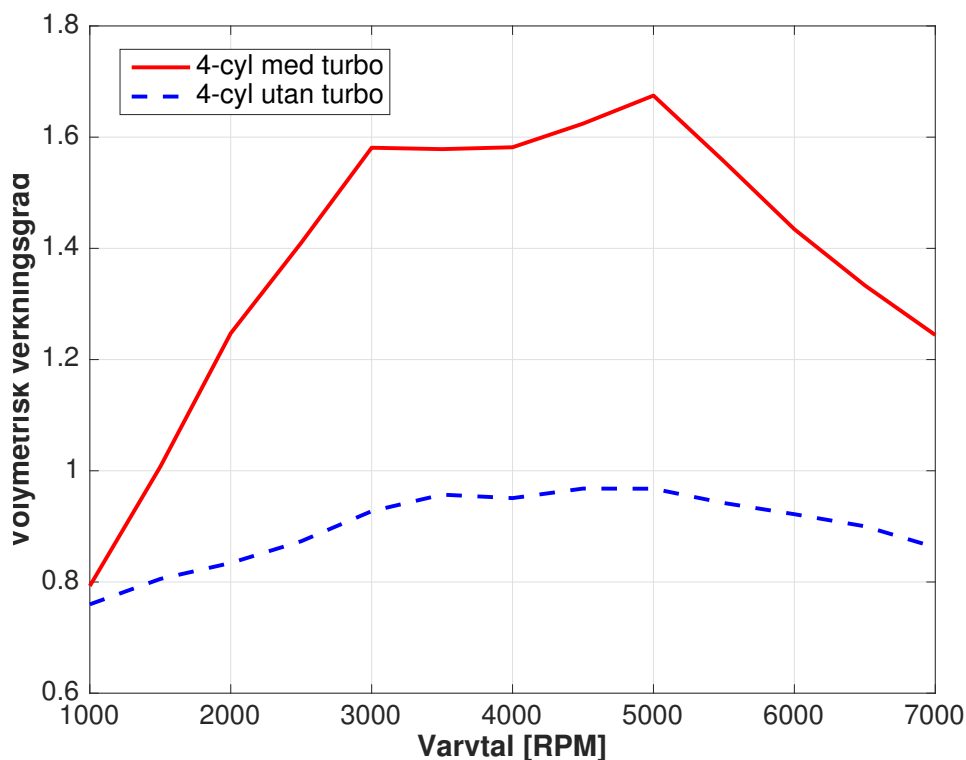


Figur 11: Graferna visar hur effekt och vridmoment varierar med kompressionsförhållandet i motorn med alla andra parametrar, inklusive varvtal, konstanta. (a) effekt med avseende på kompressionsförhållande i en motor utan överladdning. (b) vridmoment med avseende på kompressionsförhållande i en motor utan överladdning. (c) effekt med avseende på kompressionsförhållande i en motor med 1 bar överladdning. (d) vridmoment med avseende på kompressionsförhållande i en motor med 1 bar överladdning. I (a) och (b) ger ökning av kompressionsförhållandet högre än 14,0:1 inte längre någon ökning i prestanda p.g.a. knackning. Detta observeras inte i (c) och (d) som snarare följer den teoretiska ökningen i prestanda.

I fallet utan överladdning, där turbon helt enkelt kopplats ur i modellen, kördes simuleringen inledningsvis mellan 7,0:1 och 15,0:1. Vid 14,0:1 observeras en vändning där prestandan inte längre stiger efteråt, vilket blev tydligare när simuleringen kördes till 17,0:1.

I fallet med överladdning, som också startades vid 7,0:1, behövde simuleringen köras längre eftersom en liknande vändning inte inträffade, men trots att den utökades till 17,0:1 observerades inte någon vändning.

Detta innebär blandade resultat. I fallet utan överladdning observerades en vändning vid kompressionsförhållande 14,0:1 varefter prestandan inte ökade längre, utan vände nedåt. Detta förväntades och beror enligt teorin på att tryck- och temperaturökningen i cylindern orsakar knackning. Däremot observerades detta inte i fallet med överladdning, vilket var oväntat och är svårt att förklara. Troligtvis fick en eller flera parametrar orimliga värden, vilket negerade effekten av knackning. Emellertid följer de kurvorna väl den ideala kurvan i figur 5-5 i Heywood [35, kap. 5, s. 170].



Figur 12: Graferna visar hur volymetrisk verkningsgrad varierar med varvtalet i likadana motorer med den enda skillnaden att den streckade inte är överladdad och den heldragna är överladdad. Den överladdade motorn har både högre volymetrisk verkningsgrad och ett bredare varvtalsomfång. Sugmotorn är inte optimerad för körning utan överladdning och har därför lägre volymetrisk verkningsgrad än en optimerad sugmotor.

Figur 12 visar simuleringar av volymetrisk verkningsgrad med avseende på varvtalet. En färdig modell av en 4-cylindrig, överladdad motor användes. I den streckade grafen kopplades turbon bort utan att ändra några andra parametrar medan den lämnades oförändrad i den heldragna grafen. Därmed var inte varianten utan turbo optimerad för körning utan överladdning, utan den användes för att rakt av visa skillnaderna. Den streckade grafen visar inte bara att den volymetriska verkningsgraden är lägre och antar sina högsta värden i ett smalare varvtalsområde än i den heldragna, men även att den når sitt högsta värde ungefär i mitten på varvtalsområdet, d.v.s. då effekten av luftflödets rörelsemängd är som störst även utan fininställning av ventilerna. Den heldragna grafen visar emellertid att överladdning ger en klar ökning av volymetrisk verkningsgrad och utökar även varvtalsområdet där maximal verkningsgrad erhålles.

Jämförelsen i figur 12 påvisar att det finns en tydlig trend i jämförelsen mellan sugmotorer och överladdade motorer, trots befarade fel i den egenbyggda 6-cylindriga modellen i figur 9. Jämförs även dessa två grafer observeras vikten av inställningar av kompressionsförhållande och ventilöppningstider eftersom den 6-cylindriga sugmotorn har högre volymetrisk verkningsgrad än den 4-cylindriga sugmotorn som har dessa parametrar anpassade för överladdning. Den egenbyggda 6-cylindriga sugmotorn når över 100 % volymetrisk verkningsgrad mellan 4000 och 6000 RPM, vilket bekräftar teorin i avsnitt 2.11.1 att rätt inställningar av ventilöppningstider möjliggör detta.

4.3 Beräkningar

Nedan syns resultatet från beräkningarna av densitet och break mean effective pressure där vissa värden är tagna från Gt-Power.

4.3.1 Densitet

Värden som fås av GT-Power är följande:

Tabell 1: Tabellen visar resultat från GT-Power, notera att värden från den mindre motorn är efter laddluftkylaren

Cylindrar	Densitet [kg/m ³]	Temperatur [K]	Tryck [kPa]
4	2,01	352	2,05
6	1,12	300	0,98

För att få fram densiteten används ekvation (10) och värdena från tabellen ovan. Värdet för R är för *torr luft*.

$$\rho_{4\text{-cyl}} = \frac{p}{RT} = \frac{205 \cdot 10^3}{287,058 \cdot 352} = 2,0288 \text{ kg/m}^3 \quad (11)$$

$$\rho_{6\text{-cyl}} = \frac{p}{RT} = \frac{101,3 \cdot 10^3}{287,058 \cdot 300} = 1,1763 \text{ kg/m}^3 \quad (12)$$

4.3.2 Break mean effective pressure

Värden som fås av GT-Power är följande:

Tabell 2: Tabellen visar resultat från GT-Power

Cylindrar	Volym [l]	Vridmoment [Nm]	Bmep [Bar]
4	2.0	298.3	18.75
6	3.1	322.4	12.97

Tabell 2 visar värden ur GT-Power. Dessa är beräknade med förluster. Emellertid går det att beräkna dessa teoretiskt genom ekvation (7).

$$b_{\text{mep}_{\text{max}, 4\text{cyl}}} = \frac{4T\pi}{V_d} = \frac{4 \cdot 298,3 \cdot \pi}{2} = 1874,27 \text{ kPa} = 18,7 \text{ bar} \quad (13)$$

$$b_{\text{mep}_{\text{max}, 6\text{cyl}}} = \frac{4T\pi}{V_d} = \frac{4 \cdot 322,4 \cdot \pi}{3,1} = 1306,9 \text{ kPa} = 13,1 \text{ bar} \quad (14)$$

5 Diskussion

I det här avsnittet diskuteras hur arbetet i projektet har gått och hur de erhållna resultaten blivit. En jämförelse mellan den mindre överladdade motorn mot den större motorn utan överladdning kommer även göras. En diskussion kommer även föras huruvida resultaten talar för eller emot downsizing och hur det påverkar olika motorer.

5.1 GT-Power

GT-Power som tidigare inte använts av någon av studenterna ledde till problematik vid användandet i ett tidigt skede av projektet. Nedan följer tankar om programvaran och diskussion av det resultat som simuleringen gav.

5.1.1 Användande av programmet

Målet med GT-Power i projektet var att bygga upp modeller av olika system med och utan luftöverladdning för att sedan användas i simuleringar. Från simuleringarna skulle mer komplexa värden hämtas som inte kunde beräknas för hand. Simuleringarna gjordes även för att kunna jämföra olika modeller och system mer överskådligt.

Redan innan projektets början fanns ett problem med GT-Power då ingen i gruppen hade arbetat i programmet tidigare. Därför planerades en två veckor lång inläring- och uppstartsperiod in för att ge gruppen tid att bekanta sig med programmet. Det visade sig dock tidigt att GT-Power skulle bli svårare att använda än förväntat.

Programmet GT-Power är en otroligt kraftfull och avancerad simuleringsprogramvara där användaren kan bygga upp modeller och ändra parametrar fritt. Allt från cylinderdimensioner och rörageometri till värmeöverföringskoefficienter och materialtyper kan, och i många fall måste, ställas in för att simuleringar skall kunna göras.

Denna nivå av komplexitet i kombination med gruppens bristande kunskaper inom motordesign resulterade snabbt i en omfördelning av arbetsuppgifter. På grund av tidsbrist beslutades det att endast två gruppmedlemmar skulle fortsätta försöka lära sig GT-Power medan övriga medlemmar fokuserade på andra uppgifter.

I GT-Power finns det mängder med handlednings-pdf-filer och färdiga exempelmodeller. Inläringen om programmet skedde främst utifrån dessa då det inte finns någon kunskap att tillgå via internet eller litteratur. På instutitionen för Förbränning finns det personer som arbetar med GT-Power, men även deras kunskap är något begränsad, särskilt inom just projektets område kring luftöverladdning.

En anledning till informationsbristen om GT-Power på internet tros bero på det faktum att det just är en sådan avancerad programvara och dessutom väldigt dyr. Därför används den endast inom industrin och till skillnad från t.ex. MatLab, inte som undervisningsstöd. Detta resulterar i en informationsbrist då bilföretagens modeller och simuleringar är företags-hemligheter de inte gärna delar med sig av.

En annan anledning till varför det endast används inom industrin och inte privat eller i utbildingssyfte kan ha sin grund i komplexiteten hos de inställningsbara parametrarna i programmet. Många parametrar kräver matriser med datavärden vilka bilföretagen kan hämta via testning av fysiska modeller. Detta medför att ur projektets synvinkel är dessa parametrar omöjliga att få tag i och allt för komplexa för gissningar och uppskattningar. Till följd av detta har gruppen fått förlita sig på redan befintliga exempelmodeller och exempelvärden givna i pdf-filerna i GT-Power.

I slutändan bestämde sig gruppen för att använda sig helt av en färdig exempelmodell över ett system med luftöverladdning och endast konstruera en egen modell som ska motsvara en 6-cylindrig insugsmotor att jämföra med. Problemet med den 6-cylindriga motorn var att det inte fanns en 6-cylindrig bensinmotor i GT-Power utan endast en 4-cylindrig. Det fanns en 6-cylindrig dieselmotor, men då en dieselmotor är fundamentalt olik en bensinmotor i sin design och konstruktion valde gruppen att konvertera den 4-cylindriga motorn till en 6-cylindrig. Detta gjordes genom att lägga till två cylindrar i den 4-cylindriga modellen och konstruera om grenröret till luftinsuget och avgassystemet så de två extra cylindrarna kunde anslutas. Även ett antal parametrar fick ändras däribland ventiltiming och tändningsordning på cylindrarna för att en simulering skulle kunna göras.

Denna kompromisslösning är långt från optimal och gruppen har ingen insikt i huruvida de två extra cylindrarna påverkar modellen då den från början var optimerad för fyra cylindrar. Därför kan resultatet från den 6-cylindriga motorns simulering ifrågasättas, men gruppen bedömde resultatet gott nog att kunna jämföras med den luftöverladdade modellen. Detta eftersom effekt- och vridmomentkurvorna, bortsett från dalen vid 3000 RPM, följer utseendet från en riktig sugmotor men även på grund av att projektets syfte är att utforska för- och nackdelar med luftöverladdning och då är jämförelsen med den 6-cylindriga motorn mer en principiell faktor snarare än en avgörande.

5.1.2 Resultat ur GT-Power

Vid jämförelse av de båda motorerna i figur 9 (b) som visar vridmoment över varvtalsregistret så går det att se att den turboladdade modellen ger ett jämnare vridmoment över ett större intervall i varvtalsregistret. Den jämnare kurvan från turbomotorn tillåter motorn till att arbeta över ett

bredare varvtalsintervall vilket ger en större kraft oftare över växlarna, vilket är önskvärt vid t.ex. acceleration.

Om istället graferna över effekt beroende på varvtal, figurer 9 (a) jämförs, observeras att den 6-cylindriga motorn stegrar och ger en max effekt vid 6000 RPM för att sedan tappa kraft. Den 4-cylindriga motorn har en tydligare topp effekt vid 5000 RPM, detta beror på designen hos motorn.

Problemet med effekt är att det är ett mått på hur fort ett arbete kan uträttas. Effekten är vridmomentet multiplicerat med motorvarvtalet och säger inget om hur mycket arbete som kan uträttas eller hur bra. En motor med litet vridmoment kan fortfarande uträtta samma arbete som en med stort vridmoment genom att öka varvtalet. Detta kommer dock på bekostnaden av ökad bränsleförbrukning då den är beroende på varvtalet. Detta gör att jämföring av effekt sällan är särskilt relevant, då det mest säger vilken topphastighet som kan uppnås.

Istället är det ofta bättre att jämföra volymetrisk verkningsgrad som kan ses i figur 9 (c). Där syns det tydligt att den turboladdade motorn har jämnare och högre värden än den 6-cylindriga. Detta innebär att turbomotor är bättre på att ta in luft till förbränningen och därmed kan uträtta arbete mer effektivt.

När det kommer till bränsleförbrukning, som syns i figur 10, har den 4-cylindriga turbomotor en lägre bränsleförbrukning än den 6-cylindriga. Detta resultat är föga förvånande då den 6-cylindriga motorn har en större slagvolym vilket innebär att mer bränsle förs in i cylindern vid varje cykel.

Utifrån de resultat som fått fram i GT-Power påvisades det att den turboladdade motorn har fördelar gentemot motorn utan turbo. Värt att påminna är dock att den 4-cylindriga turbomotor är en exempelmodell tagen direkt från GT-Power och därmed modellerad samt framtagen av personer med betydligt mer kunskap om programmet och motordesign generellt än projektgruppen. Den 6-cylindriga motorn har gruppen tagit fram utifrån en färdig 4-cylindrig motor från GT-Power. Därför kan den 6-cylindriga motorns resultat vara missvisande och inte helt pålitliga i alla avseenden.

5.2 Beräkningar

I resultatet syns det att beräkningarna av densiteten stämmer bra överens med de värden som fås från GT-Power. Densiteten är alltså större i den överladdade motorn vilket innebär att det finns fler syremolekyler, som är den begränsande parametern vid fullt gaspådrag, per given volym. Det får till följd att kraften, vridmomentet och mean effective pressure kommer att öka [35, kap. 15, s. 869].

Resultatet gäller dock endast på en cylinder i vardera motor. Till följd av detta går det inte att visa att effekten för en motor är större än den

andra, då det finns många andra parametrar som spelar in, till exempel friktion. För att effekten ska bli större i den 4-cylindriga motorn måste varje cylinder inneha en 50 % högre luftdensitet än en cylinder i den 6-cylindriga, se resultat ur avsnitt 4.3.1. I och med att densiteten för den 4-cylindriga motorn är cirka 58 % högre än den 6-cylindriga motorn samt att bmep är högre i samma motor talar det för att den också borde ha minst lika mycket effekt som den stora. Hade jämförelsen varit mellan en 4-cylindrig motor med turbo och en utan så hade det inte varit några tvivel på att den med turbo skulle få mer effekt. Men i detta fallet, när det är två olika motorer med olika förutsättningar, är det inte lika lätt att avgöra.

5.2.1 Avgränsningar

De genomförda beräkningarna är på ideala gaser, se avsnitt 3.2.2. Den luft som motorn använder vid normal drift innehåller partiklar, smuts och luftfuktighet som inte luftfiltret helt lyckas eliminera. Detta påverkar förbränningen negativt och verkningsgraden minskar.

De begränsningar som finns i GT-Power, se avsnitt 5.1, har hindrat sätet på vilket beräkningarna genomförs. Då de inte går att få fram exakta värden utifrån simuleringen betyder det att resultatet inte heller blir exakt. Beräkningarna görs också med 0 % luftfuktighet vilket inte är möjligt i verkligheten. Detta leder till att motorn tar upp mer luft än vad som egentligen finns i realiteten.

Något som inte är medräknat i den 6-cylindriga motorn är också friktionen som finns i rör och motorn. Därmed finns inte heller värmeförluster med i beräkningarna.

De variabelvärden som används i beräkningarna, avsnitt 4.3, har hämtats från GT-Power. Tabell 1 och tabell 2 visar de värden som GT-Power har beräknat vid de aktuella parametervärdena. Således är det endast möjligt att verifiera att sambanden i ekvation (7) och ekvation (10) stämmer då den beräknade densiteten och bmep skiljer sig med en liten felmarginal. Felmarginalen beror på de antaganden som gjorts i beräkningarna om ideal gas och torr luft.

5.2.2 Övriga aspekter som påverkar resultatet

En viktig parameter som påverkar bland annat rullmotståndet och accelerationen är vikten på bilen. En 4-cylindrig motor med överladdning väger generellt sett mindre än en 6-cylindrig motor, tack vare den minskade storleken och materialmängden, vilket bidrar till ännu en positiv faktor med en mindre motor med överladdning. En 4-cylindrig motor ger också ut mindre avgaser samtidigt som den med hjälp av överladdning återanvänder avgaser. En annan viktig parameter är turbolagg. Om full effekt eftersträvas

med en gång är det bättre med den 6-cylindriga motorn.

Andra viktiga aspekter som kan påverka resultatet är mean effective pressure, mep. Mep beror väldigt mycket på vilken slags motor som finns i bilen. I detta fall kommer den större motorn få mer effekt än den mindre vid beräkningar av mep. Dock har den mindre motorn överladdning som gör att grafen pikar högre än den stora motorn vilket gör att mep för dessa motorer som gruppen räknat på är rimligt.

På grund av att beräkningarna är väldigt förenklade går det inte att få fram exakta värden. Det finns troligen fler parametrar i motorn som är relevanta och som måste beaktas, men då gruppen saknar kunskap om motordesign på detaljnivå är dessa parametrar okända.

5.3 Vidareutveckling

Gruppen har i stort sett skrapat på ytan när det kommer till överladdning och GT-power. Om värden till alla parametrar hade varit tillgängliga finns det mycket inom GT-power som skulle kunna utvecklas. Gruppen hade då kunnat inhämta mer kunskap ur programmet och finslipa på bättre modeller vilket hade gett bättre resultat. Det hade också varit möjligt att få mer exakta beräkningar som kan jämföras med värden från simuleringarna. Det hade sedan varit möjligt att undersöka överladdning djupare, till exempel fler påverkande faktorer och begränsningar.

Hade gruppen gjort arbetet igen finns det en del som kunnat göras annorlunda. Problemen med GT-Power blir svårt att göra bättre, däremot hade det varit möjligt att ta mer hjälp utifrån av någon som kan programmet bättre. Likadant gäller när det kommer till beräkningarna, med mer hjälp utifrån hade det varit möjligt att hitta alla parametrar som behövs för att jämföra motorerna och få fram ett mer trovärdigt resultat. När projektet startade fanns det inte helt klara riktlinjer som beskrev vad som skulle göras. Mycket var upp till gruppen att bestämma vilket gjorde det svårt att hitta milstolpar då dessa inte hade tillräckligt med kunskap om ämnet vid den tiden.

6 Slutsats

Överladdning är bara ett av många sätt att öka effekten och verkningsgraden hos en motor. Emellertid ger det förhållandevis stora vinster jämfört med övriga metoder, exempelvis finjustering av luft- och bränsleflöde.

Både beräkningar och simuleringar i avsnitt 4 Resultat påvisar att ett huvudsakligt område där överladdning ger stora vinster är volymetrisk verkningsgrad, se avsnitt 2.11. Detta är även en aspekt som möjliggör downsizing, vilket med bibehållen prestanda sänker massan på motorn, och därmed bilen, vilket sänker bränsleförbrukningen tack vare att mindre massa behöver accelereras. En mindre motor ger också minskade materialkostnader.

Överladdning minskar kompressionsförluster och till viss del även pumparbete, vilket ökar den termiska verkningsgraden eftersom energi inte går till spillo i samma utsträckning som i sugmotorer.

Turbo i synnerhet ger, till skillnad från mekanisk överladdning, även en ökning i termisk verkningsgrad tack vare att energi i form av gasflöde och värme från avgaserna, som annars gått förlorad, återvinns till motorn. I mekanisk överladdning hämtas denna energi från vevaxeln i motorn i stället för att hämtas från avgasflödet och därför ger den inte någon ökning i termisk verkningsgrad inom det området. Som beskrivet i avsnitt 2.3 har dock mekanisk överladdning fördelen att den inte har en fördröjning i form av turbolagg.

Jämförelsen i effekt och bränsleförbrukning visar att downsizing ger noterbara vinster. Detta utan att ta hänsyn till att den mindre motorn väger mindre, vilket gör att massan som accelereras också är mindre och det förbättrar bränsleekonomin ytterligare.

Resultatet mynnade ut i att downsizing är en bra metod att tillämpa vid vidareutveckling av förbränningsmotorer och bilar i sin helhet. Dels genom högre total verkningsgrad av motorn men också mindre vikt av fordonet. De trender som tagits fram tyder på att det finns belägg för att överladdningssystem kan komma att kompletteras med exempelvis reglerteknik som tillsammans med downsizing skapar en mindre överladdad motor. Detta kommer göra att förbränningsmotorerna kommer att kräva fortsatt utveckling och forskning tills dess att man finner bättre sätt att driva fordon på. Men innan dess ses detta koncept som framtiden med en enorm potential till utveckling.

Referenser

- [1] A. Priddle, New auto trend picks up speed: Small but mighty engines, *http://www.freep.com*, Tillgänglig: <http://www.freep.com/story/money/cars/2015/04/12/auto-big-cars-small-engines-changing-industry/25518779/>, [Hämtad: 2017-05-09]
- [2] J-C. Juncker, COMMISSION REGULATION (EU) 2016/427, *http://eur-lex.europa.eu*, Tillgänglig: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0427&from=EN>, [Hämtad: 2017-05-09]
- [3] Stockholms Stad, 2016 *miljofordon.se* <http://www.miljofordon.se/forDon/sa-fungerar-elbil> [Hämtad: 2017-05-12]
- [4] J. Edlund, s 7 *supramk3.com* Tillgänglig: <http://www.supramk3.com/turbo.pdf> [Hämtad: 2017-05-12]
- [5] I. McNeil, *An Encyclopaedia of the History of Technology*, Taylor and Francis, 2002 [Online] Tillgänglig: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/chalmers/reader.action?docID=169485> [Hämtad: 2017-02-21]
- [6] Wikipedia, *wikipedia.com* Tillgänglig: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Turbo> [Hämtad: 2017-02-21]
- [7] Turbotech, *turbotech.com* Tillgänglig: <http://turbotech.se/turbons-funktion/> [Hämtad: 2017-02-21]
- [8] turbos.bwauto.com, *turbos.bwauto.com* Tillgänglig: <http://www.turbos.bwauto.com/products/turbochargerHistory.aspx> [Hämtad: 2017-02-21]
- [9] Honeywell Garrett, *www.turbobygarrett.com* <https://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/turbochargers/gt2252> [Hämtad: 2017-04-25]
- [10] "Garrett GT25R - GT2554R - 60 TRIM - 270 HP" Tillgänglig <https://lh4.googleusercontent.com/-3fGJI78cQjI/TXEi-HUacbI/AAAAAAAAAYI/hDM9DT8Bb1M/s1600/Garrett+GT25+GT2554R+Turbocharger+picture+1+Honeywell+500x375+Turbocharger+Specs+www.TurbochargerSpecs.Blogspot.com.jpg.jpg> [Hämtad 2017-06-15]

- [11] Auto Evolution, News, *autoevolution.com* Tillgänglig: <https://www.autoevolution.com/news/forced-induction-the-supercharger-3150.html> [Hämtad: 2017-02-21]
- [12] Roots Kompressor, *superchargersonline.com* Tillgänglig: http://www.superchargersonline.com/index.php?main_page=page&id=7 [Hämtad: 2017-05-05]
- [13] Eaton webpage <http://www.eaton.com/Eaton/ProductsServices/Vehicle/markets/performance-aftermarket/Superchargers/index.htm>
Tillgänglig: http://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@eaton/@vehicle/documents/content/pct_240596.jpg Hämtad [2017-06-15]
- [14] wow.com "Roots-type Supercharger" http://www.wow.com/wiki/Roots-type_supercharger Tillgänglig: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/dc/Roots_Supercharger_efficiency_map.jpg [Hämtad 2017-06-15]
- [15] Lysholm, *lysholm.us* Tillgänglig: <http://www.lysholm.us/about.php> [Hämtad: 2017-05-05]
- [16] MotorCar "Superchargers types and history" Tillgänglig: http://images15.fotki.com/v792/photos/6/743956/8204293/KB_Cutaway-vi.jpg [Hämtad 2017-06-15]
- [17] powerperformancenews.com "How to Read a Compressor Map" Tillgänglig: <http://www.powerperformancenews.com/wp-content/uploads/sites/4/2016/03/MAP-04-1200x828.jpg> [Hämtad 2017-06-15]
- [18] Mecholic *mecholic.com* Tillgänglig: <http://www.mecholic.com/2016/07/advantages-disadvantages-applications-centrifugal-compressor.html> [Hämtad: 2017-05-11]
- [19] "HKS GTS4015HP SUPERCHARGER ASSEMBLY[12002-AK005]" Tillgänglig: <https://www.horsepowerfreaks.com/hks-gts4015hp-supercharger-assembly-p-151104111.html> [Hämtad 2017-06-15]
- [20] Wikipedia Centrifugal Compressor Tillgänglig: https://en.wikipedia.org/wiki/Centrifugal_compressor#/media/File:Cent_comp_map.PNG [Hämtad 2017-06-15]
- [21] Twincharging your engine, *torquecars.com*, 2015 Tillgänglig: <https://www.torquecars.com/tuning/twincharging.php> [Hämtad: 2017-04-25]

- [22] Volkswagen, The TSI Twincharger motors, *volkswagen.com*, 2017 Tillgänglig: <http://www.volkswagen.com.sg/en/technology/tsi-engine/the-tsi-twincharger-motors.html> [Hämtad: 2017-04-05]
- [23] R. Törnros, Volvos T6-motor utsedd till världens bästa, *teknikensvarld.se*, 2015 Tillgänglig: <http://teknikensvarld.se/volvos-t6-motor-utsedd-till-varldens-basta-motor-182624/> [Hämtad: 2017-04-05]
- [24] P. Kjellström, *teknikensvarld.se* Tillgänglig: <http://teknikensvarld.se/turbo-snart-i-var-mans-bil-120314/> [Hämtad: 2017-05-08]
- [25] S. Haj-Assaad, *autoguide.com* Tillgänglig: <http://www.autoguide.com/auto-news/2012/06/will-a-new-era-of-turbocharging-bring-back-old-problems.html> [Hämtad: 2017-05-12]
- [26] M. Ebisu; Y. Danmoto; Y. Akyama; H. Arimizu; K. Sakamoto, Development of Variable Geometry Turbocharger Contributes to Improvement of Gasoline Engine Fuel Economy, <http://www.mhi.co.jp>, Tillgänglig: <http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e533/e533030.pdf> [Hämtad 2017-05-10]
- [27] H. Jääskeläinen, "Variable Geometry Turbochargers," *dieselnet.com* Tillgänglig: https://www.dieselnet.com/tech/air_turbo_vgt.php [Hämtad: 2017-05-12]
- [28] S. Haj-Assaad, What is an Electric Turbocharger, *autoguide.com*, 2015 Tillgänglig: <http://www.autoguide.com/auto-news/2015/06/what-is-an-electric-turbocharger-.html> [Hämtad: 2017-04-25]
- [29] Formula 1, "Brakes", *formula1.com* Tillgänglig: <https://www.formula1.com/en/championship/inside-f1/understanding-f1-racing/Brakes.html> [Hämtad: 2017-05-09]
- [30] Formula 1, "Gearbox", *formula1.com* Tillgänglig: <https://www.formula1.com/en/championship/inside-f1/understanding-f1-racing/power-unit---gearbox.html> [Hämtad: 2017-05-09]
- [31] Formula 1, "Power unit and ERS", *formula1.com* Tillgänglig: https://www.formula1.com/en/championship/inside-f1/understanding-f1-racing/Energy_Recovery_Systems.html [Hämtad: 2017-05-09]
- [32] Renault F1-motor, "Lite mer om nya F1-motorn", *teknikensvarld.se*, 2014. Tillgänglig: <http://f1blogg.teknikensvarld.se/wp->

content/uploads/2014/01/Renault-F1-motor-2014-09-1024x682.jpg [Hämtad: 2017-05-09]

- [33] M. Rabe, Volvo S60 T5 Flywheel KERS – tre snabba från provkörningen *teknikensvarld.se* Tillgänglig: <http://teknikensvarld.se/volvo-s60-t5-flywheel-kers-tre-snabba-fran-provkoringen-118644/> [Hämtad: 2017-05-11]
- [34] A. Goodwin, What is engine downsizing, and why should you care?, *carkeys.co.uk*, 2016 Tillgänglig: <https://www.carkeys.co.uk/news/what-is-engine-downsizing-and-why-should-you-care> [Hämtad: 2017-04-25]
- [35] John B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, A. Duffy & J. M. Moriss, Red USA: McGraw Hill Inc., 1988.
- [36] makingdifferent.com ”What Is 2-Stroke and 4-Stroke Engine?” Tillgänglig <https://www.makingdifferent.com/2-stroke-engine-and-4-stroke-engine/> [Hämtad 2017-06-15]
- [37] Mechstuff, *mechstuff.com* Tillgänglig: <http://mechstuff.com/differences-advantages-disadvantages-of-4-stroke-2-stroke-engine/> [Hämtad: 2017-05-08]
- [38] Snowperformance, Frequently Asked Questions, *snowperformance.eu* 2017 Tillgänglig: <https://www.snowperformance.eu/BoostCooler-FAQ> [Hämtad: 2017-04-21]
- [39] GTISoft, *gtisoft.com* Tillgänglig: <https://www.gtisoft.com/> [Hämtad: 2017-04-21]
- [40] J. Edlund, s 41 *supramk3.com* Tillgänglig: <http://www.supramk3.com/turbo.pdf> [Hämtad: 2017-05-10]
- [41] Frågelådan, *fragelada.fysik.org* Tillgänglig: <http://fragelada.fysik.org/index.asp?id=16110> [Hämtad: 2017-05-08]
- [42] CircleK, *circlek.se* Tillgänglig: https://www.circlek.se/sv_SE/pg1334072467246/privat/Drivmedel/Miles/Bensin.html [Hämtad: 2017-05-08]
- [43] Nationalencyklopedin, etanol *ne.se* Tillgänglig: <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/etanol> [Hämtad: 2017-05-11]

- [44] Nationalencyklopedin, fraktionerad destillation. *ne.se* Tillgänglig: <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/fraktionerad-destillation> [Hämtad: 2017-05-09]
- [45] Diffen, Comparison Diesel and Gasoline. *diffen.com* Tillgänglig: http://www.diffen.com/difference/Diesel_vs_Petrol [Hämtad: 2017-05-09]

Bilagor

Bränsle

Bensin är ett fossilt bränsle som tillverkas av råolja och har ett energivärde på 46,4 MJ/kg. För att få ut så mycket energi som möjligt ur bränslet vid förbränning krävs det ungefär 15 gånger så mycket luft som bensin. Samtidigt producerar 1 kg bensin 3 kg koldioxid [41]. Avgaserna från förbränningen blir vatten, koldioxid och partiklar. Bensin används för att extrahera lagrad energi, som, i idealfallet, endast producerar vatten och CO₂. Problemet med bensin är inte utsläppen i sig utan att den utvinns från råolja. Den CO₂ som frigörs från fossila bränslen ingår inte i den kortsiktiga koldioxidcykeln då bildandet av fossila bränslen är på en miljonårig skala. Förbränning av bensin leder därför till en nettoökning av CO₂ i atmosfären då mer CO₂ släpps ut än vad som binds i naturen.

Dagens bensin som finns på bensinstationer runt om i landet innehåller även några procent etanol, detta sänker energivärdet hos bränslet något då etanol har lägre energiinnehåll än bensin, men blandningen är bättre ur miljösynpunkt [42]. Detta då etanol är ett förnybart bränsle som går att utvinna och tillverka av växtmaterial. Etanol tillverkad av biologiska resurser kallas bioetanol och är då tillverkad av förnyelsebara råvaror i hela kedjan. Detta gör att bioetanolen näst intill blir koldioxidneutral så länge hantlingskedjan i förädlingsprocessen också är det [43]. Därför är en minskad bensin/bränsleförbrukning önskvärt ur både kostnads- och miljösynpunkt.

Bensin jämfört med andra bränslen

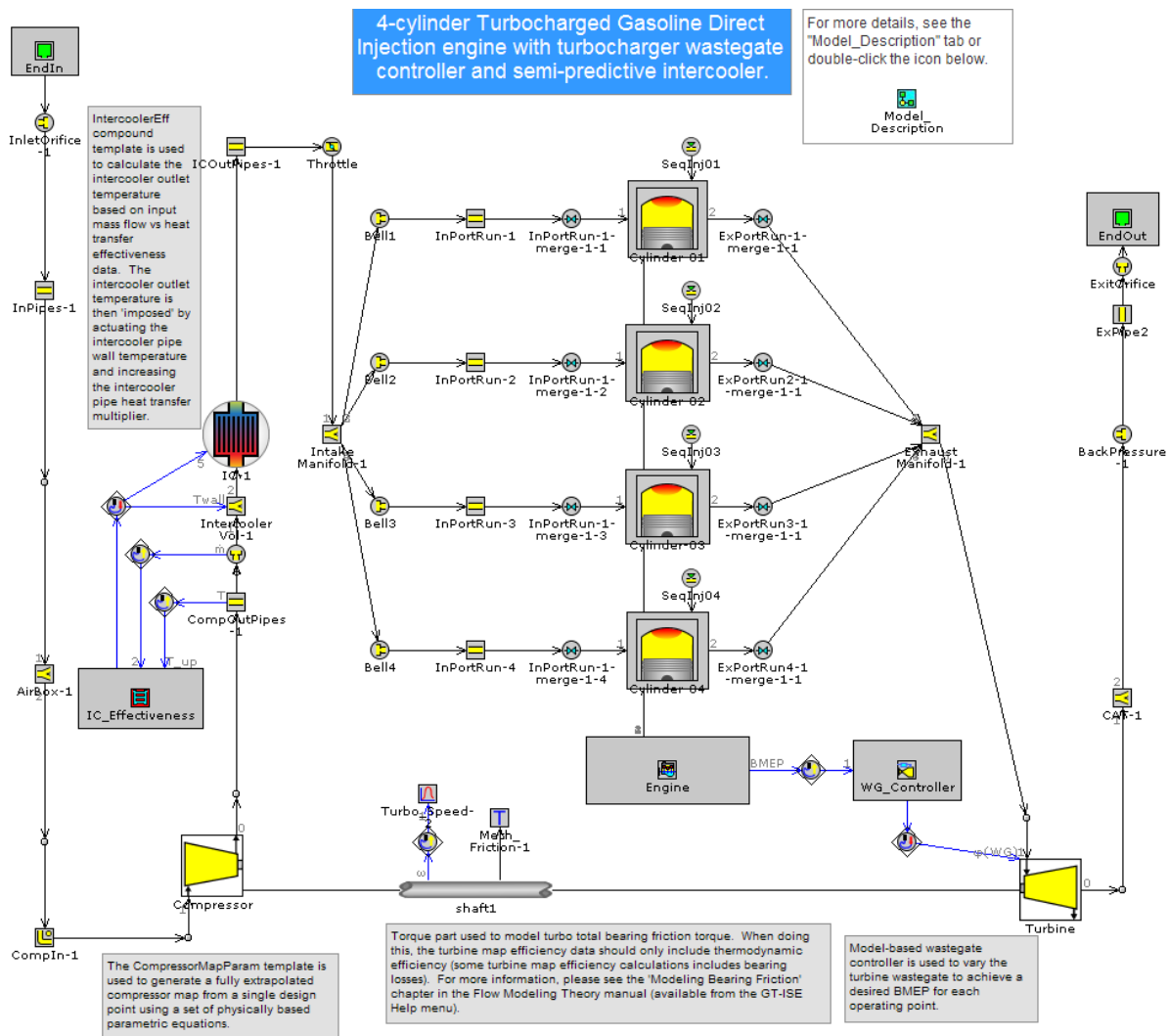
På dagens marknad finns många alternativa bränslen till bensin. Det vanligaste är diesel som likt bensin framställs ur råolja vilket sker genom en separationsprocess kallad fraktionerad destillation. Denna process separerar en blandning av dess kemiska beståndsdelar genom att utnyttja beståndsdelarnas olika kokpunkter för att förångas vissa medan andra förblir i vätskeform [44].

Diesel har en högre energidensitet än bensin på 48 MJ/kg och utöver det har dieselmotorer en högre verkningsgrad än bensinmotorer [45]. Detta resulterar i att mer mekanisk energi kan utvinnas ur diesel än ur bensin, vilket är fördelaktigt för både bränsleekonomi och miljön.

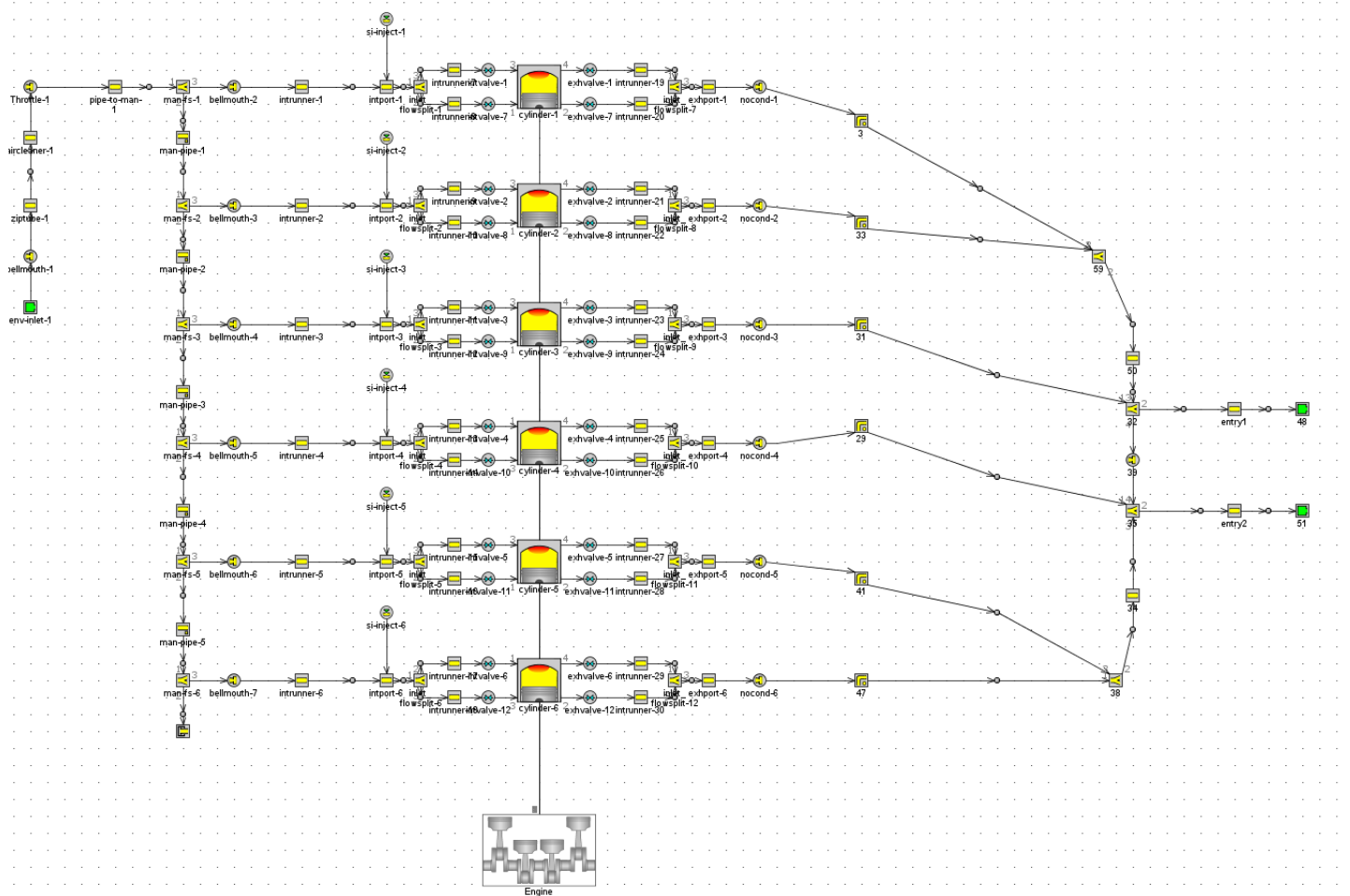
Ett annat vanligt drivmedel är etanol som blandas med bensin, vanligtvis 85 % etanol med 15 % bensin (därför namnet E85) [43]. Etanol har ett energivärde på 29,7 MJ/kg vilket är lägre än bensin, men etanol har ett högre oktantal vilket kan ge högre verkningsgrad hos motorn då högre kompression kan användas i motorn utan att riskera knockning. Dock resulterar den lägre energimängden i blandningen att bilar som använder sig

av denna blandning kräver ca 20–30% mer bränsle per mil jämfört med vanliga bensinbilar.

Modeller från GT-Power



Figur 13: GT-Power modell över 4-cylindrig motor med luftöverladdning som använts i projektet. Motorn fanns att tillgå i programmet.



Figur 14: GT-Power modell över 6-cylindrig motor utan luftöverladdning som använts i projektet. Motorn byggdes egenhändigt.