



**CHALMERS**

# Hybrid Turbocharging

Ett sätt att få bättre motoreffekt och återvinna motorkraft

Kandidatarbete inom Mekanik och maritima vetenskaper

Patrik Abrahamsson

Max Edin

Sophie Friberg

Ola Löseth

Carl Narup

Simon Rahi

**INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER**



KANDIDATARBETE 2020:12

# Hybrid Turbocharging

Patrik Abrahamsson  
Max Edin  
Sophie Friberg  
Ola Löseth  
Carl Narup  
Simon Rahi



## CHALMERS

Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper  
*Avdelningen för förbränning och framdrivningssystem*  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2020

Analys av konventionella och hybrid turboladdare

PATRIK ABRAHAMSSON  
MAX EDIN  
SOPHIE FRIBERG  
OLA LÖSETH  
CARL NARUP  
SIMON RAHI

© PATRIK ABRAHAMSSON, MAX EDIN, SOPHIE FRIBERG, OLA LÖSETH,  
CARL NARUP, SIMON RAHI, 2020.

Kandidatarbete 2020:12  
Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper  
Avdelningen för förbränning och framdrivningssystem  
Chalmers tekniska högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Sverige  
Telefon + 46 (0)31-772 1000

Tryckt av Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper  
Göteborg, Sverige 2020

## Abstract

This report is a bachelor's thesis for the program Mechanical Engineering at Chalmers University of Technology. The aim of the study was to analyse the advantages of different types of turbochargers, more specifically to see the advantages or disadvantages of hybrid turbochargers. Simulations were carried out using the engine simulation software GT-POWER. The simulations were based on a four-cylinder engine designed by GT-POWER to ensure comparable results. Multiple simulations were done using either a single or sequential turbocharger configuration for either a conventional or a hybrid turbocharger. The simulations produced values for the torque, power, BMEP, BSFC and volumetric efficiency for each of the turbocharger configurations. The results were later compared to each other as well as the naturally aspirated engine. The results showed that all models using any type of turbocharger performed more efficiently for all tested characteristics. Out of the turbocharged engines the sequential hybrid turbocharger was the prominent choice. This can be attributed to the car industries natural shift towards an environmentally friendly future as well as the effect the sequential turbo charger had on the engine characteristics.



# Innehåll

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inledning</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1      | Syfte . . . . .  | 1         |
| 1.2      | Precisering av frågeställningen . . . . .                              | 1         |
| 1.3      | Avgränsningar . . . . .  | 2         |
| <b>2</b> | <b>Teori</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1      | Ottomotor . . . . .  | 3         |
| 2.2      | Överladdning och olika sätt att skapa överladdning . . . . .           | 3         |
| 2.2.1    | Överladdning . . . . .   | 3         |
| 2.2.2    | Turboladdare . . . . .   | 3         |
| 2.2.3    | Superchargers . . . . .  | 4         |
| 2.3      | Kombinationer och olika typer av konventionella turboladdare . . . . . | 4         |
| 2.4      | Kombinationer och olika typer av hybridturboladdare . . . . .          | 5         |
| 2.5      | Ekvationer och förhållanden . . . . .                                  | 6         |
| 2.5.1    | Brake mean effective pressure . . . . .                                | 6         |
| 2.5.2    | Brake specific fuel consumption . . . . .                              | 6         |
| 2.5.3    | Volumetric efficiency . . . . .  | 6         |
| 2.5.4    | Effekt . . . . .   | 7         |
| 2.5.5    | Vridmoment . . . . .   | 7         |
| <b>3</b> | <b>Metod</b>   | <b>8</b>  |
| 3.1      | GT-POWER . . . . .   | 8         |
| <b>4</b> | <b>Resultat</b>  | <b>10</b> |
| 4.1      | Vridmoment . . . . .   | 10        |
| 4.2      | Effekt . . . . .   | 12        |
| 4.3      | Break specific fuel consumption . . . . .                              | 13        |
| 4.4      | Break mean effective pressure . . . . .                                | 14        |
| 4.5      | Volumetric efficiency . . . . .  | 15        |
| <b>5</b> | <b>Diskussion</b>  | <b>16</b> |
| 5.1      | GT-POWER . . . . .   | 16        |
| 5.2      | Vridmoment . . . . .   | 16        |
| 5.3      | Effekt . . . . .   | 16        |
| 5.4      | Break specific fuel consumption . . . . .                              | 17        |
| 5.5      | Break mean effective pressure . . . . .                                | 17        |
| 5.6      | Volumetric Efficiency . . . . .  | 17        |
| 5.7      | Vidareutveckling . . . . .   | 18        |
| <b>6</b> | <b>Slutsats</b>  | <b>19</b> |
| <b>A</b> | <b>GT-POWER modeller</b>   | <b>i</b>  |
| A.1      | Modell för sugmotor . . . . .  | i         |
| A.2      | Modell för enkel turbo . . . . .                                       | i         |
| A.3      | Modell för hybridturbo . . . . .                                       | ii        |
| A.4      | Modell för hybrid tvåstegsturbo . . . . .                              | ii        |
| A.5      | Modell för tvåstegsturbo . . . . .                                     | iii       |

# 1 Inledning

Naturligt aspirerade förbränningsmotorer har länge utnyttjas inom fordonsbranschen för deras pålitliga konstruktion. Dessa motorer använder luft vid atmosfärstryck för att driva förbränningen. På grund av den rådande klimatkrisen är det idag av stort intresse att i fordonsindustrin få ner bränsleförbrukningen så mycket som möjligt. Utvecklingen går därför allt mer mot miljövänliga alternativ.

Förbränningsmotorn kan vid en snabb anblick anses vara döende i jämförelse med elmotorn som inte släpper ut några avgaser. De eldrivna bilar som i nuläget finns i bruk har dock en begränsad körsträcka per laddning och tar längre tid att ladda jämfört med lättantändliga bränslen så som diesel och bensin. När längre avstånd ska avverkas behöver påfyllning av energi ske enkelt och snabbt, vilket är en anledning till varför elmotorer inte håller måttet inom dessa användningsområden. Vid tunga energikrävande transporter hade det även med nuvarande teknik för elfordon krävts väldigt stora och tunga batterier, vilket gör att lastkapaciteten blir lidande. Det finns därför anledning att fortsatt inkludera och förbättra förbränningsmotorn i industrin. För att öka effekten och vridmomentet på en naturligt aspirerande motor krävs dock en större motorstorlek, vilket leder till tyngre fordon och högre utsläpp. I utvecklingen framåt är det därför nödvändigt att med hjälp av olika processer och motorkombinationer hitta och förbättra befintliga lösningar som minskar fordonsutsläppen.

Överladdning är en process som komprimerar luften för att på så sätt öka mängden bränsle som kan förbrännas samtidigt och därmed få ut mer effekt och vridmoment, utan att behöva öka motorns volym och till en mindre bränsleförbrukning. Överladdning är implementerat i så kallade turboladdare. Konventionella turboladdare tar energi direkt ifrån motorns avgaser för att trycksätta förbränningsluften, detta görs genom att driva avgaserna genom en turbin. För att turbinen ska fungera krävs dock en viss mängd avgaser, vilket gör att turboladdaren inte börjar jobba förrän motorn kommit upp i tillräckligt höga varvtal. En hybridturboladdare drivs istället helt eller delvis av elektrisk energi lagrat i ett batteri, detta gör att reglering av processen blir lättare och fördröjningar minskas.

## 1.1 Syfte

Arbetet syftar till att genom simuleringar undersöka om potentialen för energiåtervinning och motoreffekt ökar hos olika turbokonfigurationer, bland annat en hybridturbo och en konventionell turbo, i jämförelse med en motor utan någon som helst överladdning. Dagens turboladdare och deras egenskaper ska också diskuteras i arbetet.

## 1.2 Precisering av frågeställningen

I rapporten kommer följande frågor att besvaras:

- Är hybridturbo bättre än en konventionell turbo med avseende på bränsleförbrukning?
- Vad är fördelarna och nackdelarna med att använda hybridturbo jämfört med konventionell turbo eller ingen turbo?
- Vilken turbokonfiguration ger högst effekt?
- Är hybridturboladdare ett bra val för dagens motorer?



### 1.3 Avgränsningar

Inga fysiska modeller skapades under projektet. Resultat och slutsater är helt dragna utifrån simuleringar gjorda i programmet GT-POWER. För att resultaten lätt ska kunna jämföras utgår alla simuleringar från samma grundmotor, som sedan byggs ut med olika turbo konfigurationer. Vid andra storlekar, typer samt dimensioneringar av motorer kan resultatet eventuellt variera. Slutsatsen för rapporten kan därför inte med säkerhet generaliseras till andra motorer eller konfigurationer som ej testats. All form av lagring och skapande av elektrisk energi i form av batterier och generatorer som driver hybridurbos kommer ej att behandlas i detta projektet. Det innebär ett antagande att vi har oändligt med elektrisk energi från batterier.

## 2 Teori

Detta kapitel behandlar information om hur förbränningsmotorer och turbos fungerar. Det behandlar även teorin bakom överladdning, turboladdning och de ekvationer och samband som beskriver motorns prestanda.

### 2.1 Ottomotor

Ottomotorn är en förbränningsmotor som konstruerades av Nicolaus Otto runt år 1870. Den är idag den vanligaste motorn i personbilar och motorcyklar, men används även i många andra sammanhang. Ottomotorn drivs oftast på bensin men kan även drivas på gas. Ottomotorn är en kolvmotor, där förbränning av en luft-bränsle-blandning sker för att utvinna energi. (Nationalencyklopedien)

De flesta ottomotorer är fyrtaktiga vilket innebär att de drivs i fyra steg. Först öppnas en insugsventil som släpper in luft i cylindern och tvingar kolven att röra sig neråt. Denna ventil stängs sedan och kolven rör sig uppåt vilket leder till att luften komprimeras. När kolven är nära det översta läget sprutas bränsle in och blandar sig med luften. Ett tändstift ger då ifrån sig en gnista som leder till att bränsleblandningen antänds. I det tredje steget expanderar gasen och tvingar återigen ner kolven. Sist så öppnas en avgasventil som släpper ut luften i cylindern då kolven åker upp igen och cykeln börjar sedan om på nytt igen. Kolvens rörelse överförs till en vevaxel som skapar en roterande rörelse som i en bil överförs först till växellådan och vidare till hjulen. Tidiga ottomotorer använde förgasare där bränslet och luften blandades, men detta är idag mer ovanligt. Istället används elektroniska bränsleinsprutare, som ger en mer effektiv förbränning och därmed en minskad bränsleförbrukning. (Nationalencyklopedien)

### 2.2 Överladdning och olika sätt att skapa överladdning

För att utvinna mer effekt ur en ottomotor krävs mer energi vilket fås ur förbränningen av bränslet. Maximal mängd av den kemiska energin i bränslet som kan omvandlas till mekanisk energi fås om förbränningen sker stökiometriskt, det vill säga så effektivt som möjligt. Givet att detta är fallet krävs dels en större mängd bränsle, men även en större mängd syre för att få ut mer effekt ur motorn. Följaktligen krävs då antingen en större motorvolym, alternativt en högre densitet på den insprutade luften. Det sistnämnda sker med hjälp av överladdning. För att uppnå överladdning används antingen turboladdare eller superchargers.

#### 2.2.1 Överladdning

Uttrycket överladdning är den generella termen för att trycksätta luften som sprutas in i motorn till ett tryck som är högre än atmosfärstrycket. Eftersom trycket ökar innebär det också att densiteten på luften ökar och vilket leder till att mer syre finns tillgängligt och mer bränsle kan förbrännas, det går därför att utvinna mer energi per motorcykel. För att uppnå en tryckökning krävs det att luften passerar en kompressor på väg in i motorn. Efter att luften passerat kompressorn så ökar även luftens temperatur i och med tryckökningen, detta är inte önskvärt eftersom att då ökar densiteten. För att överladdningen ska fungera optimalt krävs därför att luften kyls ned igen innan den förs vidare till insugsgrenröret, detta för att öka densiteten igen. Laddluftskylaren är ansvarig för denna kylningsprocess och fungerar som en radiator genom att svalare luft eller vatten sänds genom ett system av rör för att kyla ner luften som kommer från kompressorn. (Woodford)

#### 2.2.2 Turboladdare

Turboladdare uppfanns av Alfred Büchi i slutet av 1800-talet, som tyckte att dåtidens förbränningsmotorer var ineffektiva och kunde förbättras. Büchi tog fram en modell där energin från avgaserna förhöjde luft-bensin blandningen. Avgaserna spolade upp en turbin som förde över rotationsenergi med hjälp av en axel till en kompressorsida där luft trycktes in i motorn. Turbon implementerades i flygplan då den gav möjlighet att ge högre motoreffekt vid tunnare luft. Detta gav flygplan möjligheten att flyga vid högre höjder under en längre period med en relativ konstant motoreffekt. Under andra världskriget användes turboladdade motorer i krigsflygplan för att göra

dom snabbare och mer effektiva. Därefter blev turboladdare kommersiella inom bilmärknaden och är idag vanligt förekommande. I dagens läge används turboladdare bland annat för att minska utsläppet från bilar. En mindre motor resulterar i att mindre bränsle behövs för att driva fordonet och därmed att utsläppet minskas. Turboladdare används även i andra sammanhang där högre effekt önskas utan att öka motorens storlek. Exempel på detta är flygplan, lastbilar, motorcyklar och inom sjöfart. (Turbosmart)

Då turboladdare drivs av motorens avgaser krävs ett visst flöde för att turbinen och kompressorn ska börja snurra nog snabbt för att skapa ett övertryck, detta innebär att en turboladdare inte kan skapa överladdning förrän vid ett visst motorvarvtal som oftast ligger kring 1000-1200 rpm. Användningen av turboladdare är också bara lämpligt för flercylindriga motorer då encylindriga inte genererar nog med avgaser för att driva runt turbinen. (Engineering Explained)

Den främsta fördelen med att använda sig av turboladdare gentemot superchargers som är ett vanligt substitut är att turboladdare använder avgasernas rörelse- och värmeenergi som annars skulle gå förlorad för att skapa övertryck. Detta innebär att man inte tar någon energi direkt från motorn så man tappar ingen effekt då (Engineering Explained). Turboladdares främsta nackdel är att det måste finnas nog med avgaser för att skapa övertryck vilket gör att dem inte är så responsiva och att det blir en liten försening innan den ökade effekten kommer vilket kallas för "turbo lag". Fördröjningen är orsakad av att motorn vid låga varvtal producerar en otillräcklig mängd avgaser för att driva systemet samt den mekaniska uppspolningströgheten av kompressor och turbin. Det går att minska hur mycket "turbo lag" som blir genom att exempelvis använda sig av en mindre turbo eller flera seriekopplade turbos. (Wilson)

### 2.2.3 Superchargers

En supercharger använder en drivrem som är kopplad från motorn till en kompressor, och uppnår alltså överladdning genom att ta en del av motorens mekaniska energi för att driva runt kompressorn. Dessa används mer sällan än turboladdare då de ej återvinner någon tappad energi och på så sätt är sämre ur en energiåtervinnings synpunkt, det är även därför de ofta används i samband med en turboladdare för att kunna ta vara på den energi som annars skulle gå förlorad i avgaserna. Den främsta fördelen med att använda sig av supercharger istället för turboladdare är att de är mer responsiva då de drivs direkt av motorn vilket gör att motorn behåller sin karakteristik, dvs. turbolag elimineras. De största nackdelarna som följer med att endast använda en supercharger som överladdare är att den drivs av motorn vilket gör att man tappar en del effekt, upp till 20% och att all energi som finns i avgaserna tappas. (Harris)

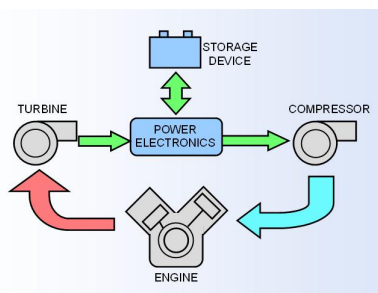
## 2.3 Kombinationer och olika typer av konventionella turboladdare

Turboladdare kan kombineras för att skapa mer effektiva system. Ett exempel på detta är en så kallad "Twin turbo", eller "biturbo", som utnyttjar två turboladdare för att trycksätta luftflödet in till motorn. Twin turbo används när motorens avgasventiler är separata och det finns två enskilda avgasflöden som kan användas för att spola upp båda turboladdarna. Därefter matas den komprimerade luften tillbaka in i motorn för att överladda den.

En sequential turbo konfiguration utnyttjar en stor och en liten turbo för att skapa mer effekt i motorn. Båda turboladdarna använder samma avgaser för att spola upp turbinsidan. I början av processen används alla avgaser för att spola upp den mindre turbon. Eftersom den mindre turbinen har ett lägre tröghetsmoment används den för att ge effekt till motorn vid lägre varvtal. När avgaserna överskrider ett viss tryck öppnas en omkopplingsventil som omdirigerar luften till den större turbon. Den mindre turbon används för att minimera turbolag tills varvtalen i motorn skapar tillräckligt mycket tryck för att den större turbon ska komma upp i högre varvtal. Tillsammans skapar den en mer linjär effektkurva vilket är mer önskvärt. (Kirsten)

## 2.4 Kombinationer och olika typer av hybridturboladdare

Hybridturboladdare används bland annat i formel 1 divisionen i motorsport. En hybridturboladdare, till skillnad från en konventionell turboladdare, drivs inte enbart på energi utvunnen från avgaserna utan även helt eller delvis av elektrisk energi lagrat i batteriet. Se Figur 1. Somliga konfigurationer utnyttjar även ett system där kinetiskenergi vid inbromsning omvandlas till elektrisk energi för att ladda batteriet. I konventionella turboladdare tillfinnes viss fördröjning innan kompressorn tillåts börja trycksätta luften. En elektroniskt styrd kompressordel kan variera tryck och flöde mycket snabbare när den är fränkopplad från den mekaniska turbindelen. Mindre massa ger snabbare respons och ett bättre utnyttjande av den komprimerade luften som bildas. Det kan innebära att enbart den luft som krävs behöver bildas, vilket innebär färre förluster. I den konventionella turboladdaren sköts detta genom en övertrycksventil som släpper ut överflödigt tryck.

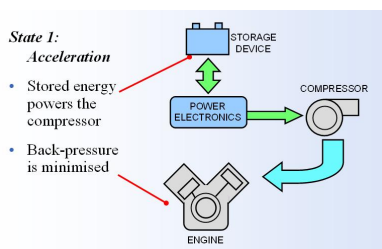


Figur 1: Här visas en enkel hybridturbokonstruktion. Axeln mellan turbin- och kompressorsidan är kopplad till ett batteri. (Wikipedia)

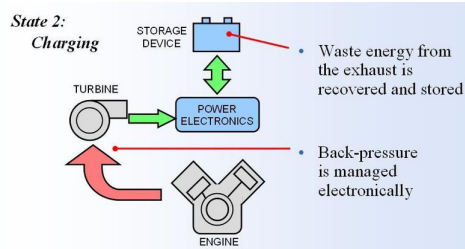
Garret som är en av de stora tillverkarna av turboladdare, har tagit fram och utvecklar en E-turbo. Denna E-turbon har en elektrisk motor mellan turbin- och kompressorhuset. Konfigurationen reglerar och hjälper till att få fart på kompressorn när energin från avgaserna inte räcker till. Den hjälper också till med att eliminera "turbo lag" som kan ske vid låga varvtal. Det gör att behovet av en tvåstegsturboladdare för att kompensera det för låga flödet vid låga varvtal inte är nödvändigt. (Garret)

Om turbinsidan producerar mer energi än vad kompressor sidan behöver är det möjligt att återvinna och lagra denna energi, detta visas i Figur 3. Den lagrade energin kan sedan användas då motorn återgår till ett lågt varvtal för att spola upp kompressorn vid acceleration. Se Figur 2. (Petranay)

Audi har tagit fram en elektrisk turbo som kompletterar den avgasdrivna turboladdaren på låga varvtal där motorns avgaser inte är tillräckliga för att uppnå det önskade luftflödet. När varvtalet ökar och den konventionella turbon klarar av att ge laddtrycket som behövs så aktiveras en bypassventil. Luften går då in i motorn utan att passera den elektriska turbon. Denna tekniken ihop med deras 3 liters dieselmotor resulterar i att körbarheten blir bra, med ett högre vridmoment på lägre varv och snabbare gasrespons tack vare den snabba spool up tiden för en elturbo. (Audi)



Figur 2: Acceleration. (Wikipedia)



Figur 3: Laddning. (Wikipedia)

## 2.5 Ekvationer och förhållanden

För att kunna besvara frågeställningen behöver de olika turbokonfigurationerna jämföras mot varandra med avseende på brake mean effective pressure, brake specific fuel consumption, volumetric efficiency, effekt och vridmoment. Dessa parametrar och samband beskrivs i avsnittet nedan.

### 2.5.1 Brake mean effective pressure

Brake mean effective pressure, BMEP, är ett mått på en förbränningsmotors förmåga att producera arbete, oberoende av motorns storlek. Detta gör BMEP mer användbart vid jämförelse av förbränningsmotorer än vridmoment då detta är beroende av motorns storlek.

BMEP definieras som en cylinders producerade arbete per arbetscykel dividerat med cylinderns undanträngda volym per arbetscykel.

$$W_{percykel} = \frac{Pn_R}{N}$$

Där  $n_R$  är antalet varv som vevstaken roterar per kraftslag, alltså 2 för 4-taktscykler och 1 för 2-taktscykler. BMEP kan även beskrivas med hjälp av vridmomentet,  $T$ , då detta är beroende av både arbetet och vinkelhastigheten, BMEP kan då uttryckas enligt ekvation (1):

$$BMEP = \frac{Pn_R}{V_d N} = \frac{2\pi n_R T}{V_d} \quad [bar] \quad (1)$$

(Heywood, 1988, p.50)

### 2.5.2 Brake specific fuel consumption

Brake specific fuel consumption, BSFC, är ett mått på hur effektivt en motor omvandlar bränsle till nyttigt arbete. BSFC är per definition bränslets flödestakt per arbetsenhet och ges av ekvation (2).

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad [g/Kw - h] \quad (2)$$

Där  $\dot{m}_f$  är bränslets massflöde per tidsenhet och  $P$  är den nyttiga effekten producerad av förbränningsmotorn.

BSFC används för att jämföra effektiviteten mellan olika förbränningsmotorer. Låga värden på BSFC är eftersökt eftersom detta innebär mer producerad effekt per enhet bränsle vilket är gynnsamt både ur ett ekonomiskt och hållbart perspektiv.

(Heywood, 1988, p.51-53)

### 2.5.3 Volumetric efficiency

Volumetric efficiency för förbränningsmotorer,  $\eta_v$ , är definierat som förhållandet mellan densiteten av bränsle-luft-blandningen vid atmosfärstryck som sugns in i cylindrarna dividerat med densiteten av samma volym luft i insugsgrenröret.

Volumetric efficiency används som ett mått på en förbränningsmotors effektivitet då förbränningsmotorer ofta begränsas av mängden luft eller syre som används vid förbränning av bränsle. Ett teoretiskt värde på den volymetriska effektiviteten,  $\eta_v$ , kan beräknas enligt ekvation (3)

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

Där  $V_d$  är den undanträngda volymen i en cylinder,  $\dot{m}_a$  är massflödet av luften som sugns in i systemet och  $\rho_{a,i}$  är densiteten av luften som sugns in i systemet. (Heywood, 1988, p.53-54)

#### 2.5.4 Effekt

Effekt,  $P$ , är en parameter som ofta används vid jämförelse av förbränningsmotorer. Detta är för att effekt definieras som den takten som en motor utför arbete med. Effekten för en förbränningsmotor beskrivs som produkten av motorns vridmoment och vinkelhastighet och skrivs på ekvationsform enligt ekvation (4)

$$P = T \cdot 2\pi N \quad [hp] \quad (4)$$

Där  $T$  är motorns vridmoment och  $N$  är vevaxelns rotationshastighet.

(Heywood, 1988, p.46)

#### 2.5.5 Vridmoment

Vridmoment,  $T$ , är en parameter som ofta används i motorsammanhang, detta är för att vridmoment används som ett mått på en motors förmåga att genomföra arbete och är därför användbart vid jämförelse av olika motorer. Vridmoment definieras som kraften gånger momentarmen och skrivs på ekvationsform enligt ekvation (5)

$$T = F \cdot r \quad [Nm] \quad (5)$$

Där  $F$  är variabeln för kraft och  $r$  är variabeln för momentarmens längd.

(Heywood, 1988, p.45-46)

## 3 Metod

Arbetet bestod främst av simuleringar i GT-POWER. De parametrar som tagits fram för analys är vridmoment, effekt, break specific fuel consumption (BFSC), break mean effective pressure (BMEP) och Volumetric efficiency. Resultat togs fram för en vanlig sugmotor utan turbo, samma motor med en konventionell turbo, en enkel hybridturbo, en tvåstegs hybridturbo samt en tvåstegs konventionell turbo.

### 3.1 GT-POWER

GT-POWER är en standardiserad programvara som tillåter användaren att simulera olika motor-konstruktioner. Mjukvaran mäter olika parametrar som exempelvis effekt, vridmoment, luftflöde och bränslekonsumtion. Uppbyggnaden av motorn visas i ett fönster i mjukvaran vilket tillåter användaren att visualisera motorn och dess komponenter. Programmet visar också utvalda diagram och värden på önskade parametrar. Detta program är speciellt värdefullt för det här projektet då mer specifika jämförelse kan göras mellan olika motorkonfigurationer.

För att kunna beräkna och därefter jämföra motoreffekt och bränsleförbrukning för olika motorsystem så användes en specifik motor som utgångspunkt som därefter modifierades med olika turbokonfigurationer för att kunna jämföra de olika motorsystemen. Motorn som användes som utgångspunkt är en "spark ignition engine" som byggdes utefter ett av de handledningsexempel som finns inbyggda i programvaran.

De olika motorsystem som gruppen ansåg intressanta att jämföra listas nedan. Dessa finns även i bilaga A.

- Konventionell sugmotor utan turboladdare
- Motor med enkel konventionell turboladdare
- Motor med enkel hybridturboladdare
- Motor med tvåstegs hybridturboladdare
- Motor med tvåstegs konventionell turboladdare

Den konventionella sugmotorn är som tidigare nämnt uppbyggd efter ett av handledningsexemplena som finns i GT-POWER. Det är en fyrcylindrig bensinmotor med en total cylindervolym på 2 liter och ett kompressionsförhållande på 9,5. Modellen har ingen överladdning och inte heller någon laddluftkylare, den passar därför bra som grund till de andra modellerna som har överladdning.

Modellen med en konventionell turboladdare har som de andra modellerna sugmotorn som grund, skillnaden är att modellen är utbyggd så att den även innehåller en turboladdare och laddluftkylare för att skapa en effektiv överladdning. Både turboladdaren och laddluftkylarens dimensioner och verkningsgrader hämtades från ett annat exempel som finns inbyggt i GT-POWER.

Den konventionella tvåstegsturbon är uppbyggd med samma laddluftkylare som används i den konventionella turbomodellen men istället för att endast använda en turbo används två turboladdare. Turboladdarna är seriekopplade och en mindre turbo används vid låga varvtal och en större turbo används vid högre varvtal för att kunna skapa tillräckligt hög överladdning. Även dessa turboladdares dimensioner och värden hämtades från färdiga exempel ur GT-POWER.

Både den konventionella turbon och tvåstegsturbon har också en hybridvariant av sig själva, detta innebär att modellerna i stort sett är samma förutom att i enkelturbovarianten är en elmotor kopplad till axeln mellan turbinen och kompressorn medan i tvåstegsvarianten är den lilla turbinen utbytt helt mot en elmotor. I båda hybridmodellerna togs beslutet att inte simulera en generator utan det antogs att elmotorerna fick sin ström från ett redan befintligt batteri.

Efter alla modeller var uppbyggda och fungerade som tänkt krävdes det att dessa optimerades för att prestera på bästa sätt. Alla modellers kontroller som styrde exempelvis turboladdarnas övertrycksventil och motorns gasreglage styrdes beroende på vilket BMEP som skulle uppnås. Därför skedde optimeringen genom att få så högt BMEP utan att knock skulle förekomma i cylindrarna. Knock är ett fenomen där bränsle-luft blandning brinner i ojämna fickor i cylindern vilket kan leda till förtidsexplosion och kan orsaka knockningar. Fenomenet är väldigt skadligt för motorkomponenter speciellt kolvarna och måste elimineras vid motordimensionering.



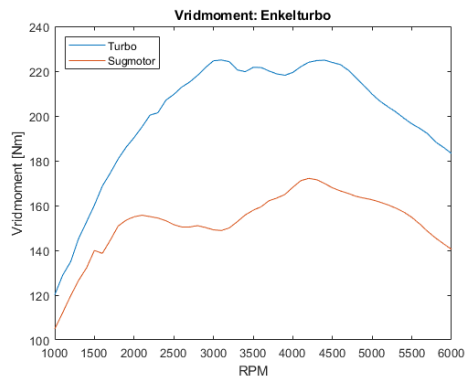
## 4 Resultat

Från simuleringarna i GT-POWER togs grafer fram för olika parametrar för att kunna jämföra resultatet för de olika turbokonfigurationerna. De parametrar som jämförs är vridmoment, effekt, BFSC, BMEP och volumetric efficiency. Graferna som tagits fram jämför de olika turbokonfigurationerna mot en vanlig sugmotor, för varvtal mellan 1000-6000 RPM.

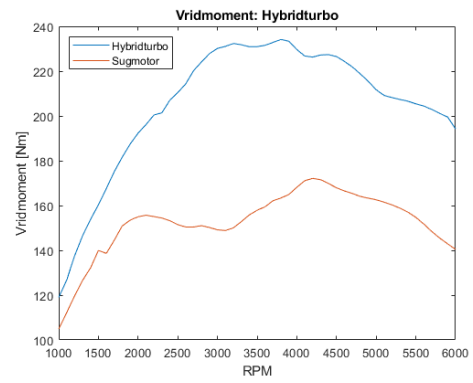
### 4.1 Vridmoment

Figur 4-7 visar kurvorna för vridmomentet för de olika turbokonfigurationerna. Dessa visar tydligt att de fyra olika turbokonfigurationer som simulerats har högre vridmoment än sugmotorn. Detta gäller för hela RPM-intervallet som modellerna är simulerade över. En annan observation som är tydlig från figurerna är att modellen med enkel konventionell turbo och modellen med enkel hybridturbo är väldigt lika över RPM-intervallet bortsett från att hybridturbon har något högre vridmoment mellan 3000 och 4000 RPM samt att vridmomentet är något högre mellan 5000 och 6000 RPM.

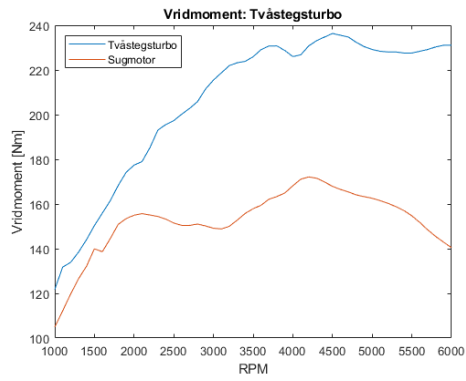
Tvåstegsmodellerna är också ganska lika överlag. Tvåstegshybridturbos kurvan har en nedgång vid 5000 RPM medan den konventionella tvåstegsturbo kurvan håller sig konstant efter 5000 RPM. En tydlig observation från dessa är att de inte har samma nedgång vid ungefär 4000 RPM som enkelturbo-konfigurationerna. Generellt har alla fyra konfigurationer inte så stor skillnad på maximala vridmoment som landar mellan 220 och 230 Nm, de enkelturbo-konfigurationerna uppnår maximala moment vid 3000 RPM medan de tvåstegsmodellerna uppnår det senare vid ungefär 4000-4500 RPM.



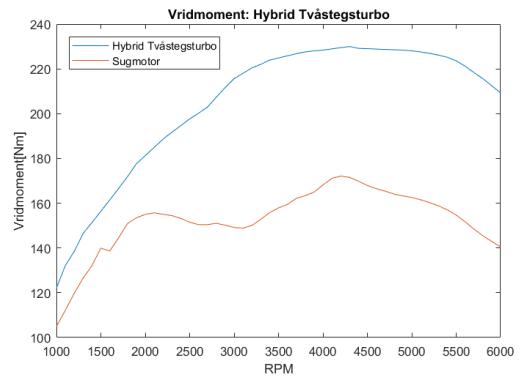
Figur 4: Vridmoment för konventionell turbo och sugmotor



Figur 5: Vridmoment för hybridturbo och sugmotor



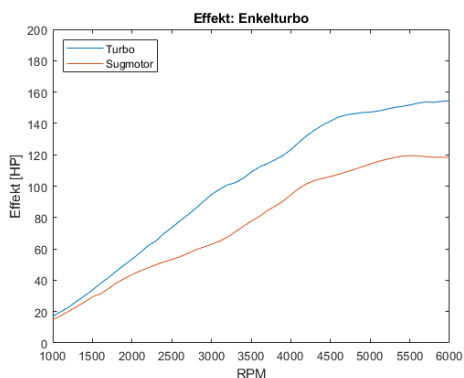
Figur 6: Vridmoment för tvåstegsturbo och sugmotor



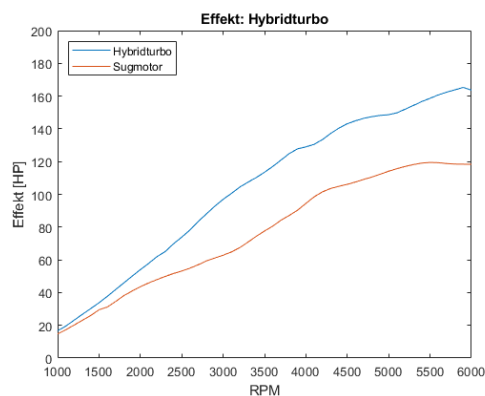
Figur 7: Vridmoment för tvåstegs hybridturbo och sugmotor

## 4.2 Effekt

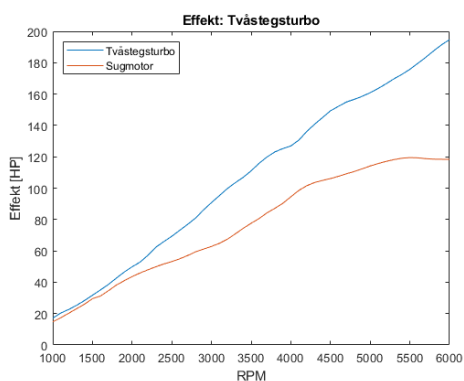
Figur 8-11 visar effektutvecklingen för de olika turbokonfigurationerna. Det syns tydligt att även effekten är högre för de fyra turbokonfigurationerna än för sugmotorn utan någon turbo, också detta över hela RPM-intervallet. Precis som för resultaten för motoreffekten så ser vi att de två enkelturbo-konfigurationerna är väldigt lika varandra bortsett från att hybridturbon har högre effekt än den konventionella turbon från ungefär 4500-6000 RPM. Den konventionella tvåstegsturbon uppnår högsta effekten jämfört med de andra konfigurationerna, men om man jämför enkelturbo-konfigurationerna mot tvåstegs-konfigurationerna så ser man tydligt att båda tvåstegskonfigurationerna har betydligt högre effekt mot de högre varvtalen i intervallet än enkelturbo-konfigurationerna.



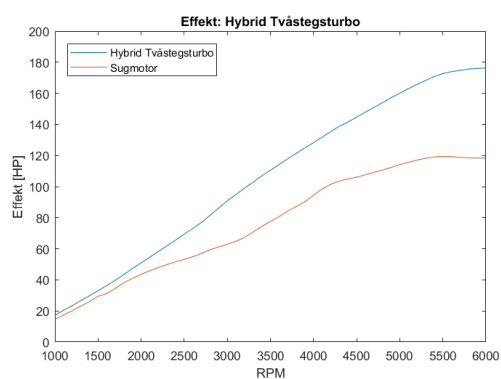
Figur 8: Effekt för konventionell turbo och sugmotor



Figur 9: Effekt för hybridturbo och sugmotor



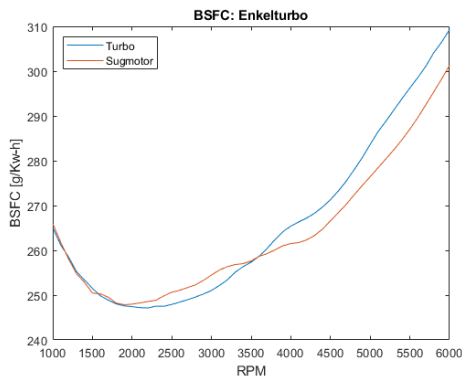
Figur 10: Effekt för tvåstegsturbo och sugmotor



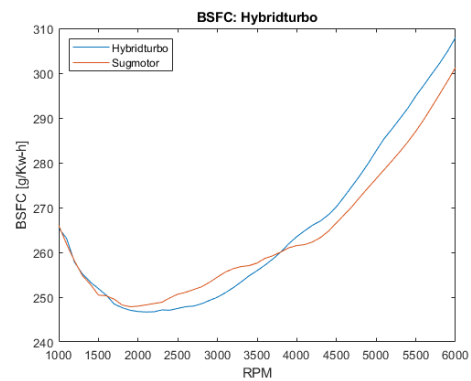
Figur 11: Effekt för tvåstegs hybridturbo och sugmotor

### 4.3 Break specific fuel consumption

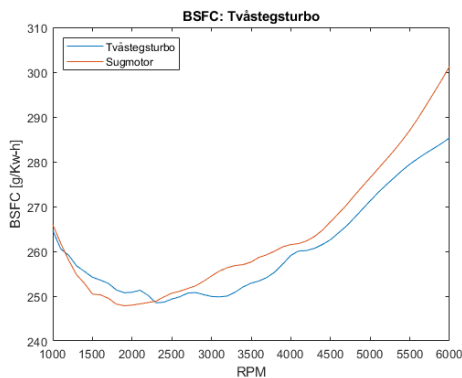
Figur 12-15 visar BSFC för de olika turbokonfigurationerna. Det observeras att enkelturbo-konfigurationerna och tvåstegshybridturbon har lägre bränsleförbrukning än sugmotorn vid de lägre varvtalen. Dock är det märkbart att enkelturbo-konfigurationerna har högre bränsleförbrukning än sugmotorn vid de högre varvtalen. För tvåstegskonfigurationerna ser vi i Figur 14 och 15 att det skiljer sig mycket från enkelturbo-konfigurationerna. Tvåstegsturbo har något högre bränsleförbrukning än sugmotorn vid de låga varvtalen. Vidare har de tvåstegskonfigurationerna betydligt lägre bränsleförbrukning vid de högre varvtalen. Före 2000 RPM är linjerna väldigt lika sugmotorn. Det här kan bero på att motorerna i turboexemplaren beter sig väldigt likt sugmotorn innan turboladdarna har börjat spola upp och ge mer effekt ur motorn. Därefter skiljer linjerna på grund av att mer luft komprimeras in i motorn och därmed minskar bränsleförbrukningen i dessa fall.



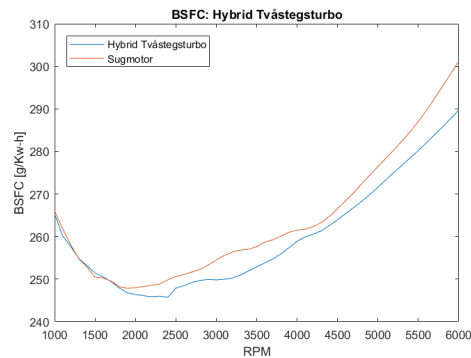
Figur 12: BSFC för konventionell turbo och sugmotor



Figur 13: BSFC för hybridturbo och sugmotor



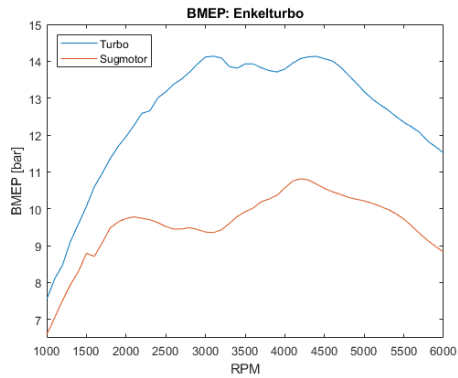
Figur 14: BSFC för tvåstegsturbo och sugmotor



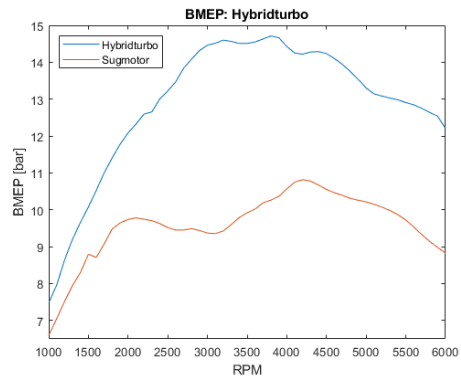
Figur 15: BSFC för tvåstegs hybridturbo och sugmotor

#### 4.4 Break mean effective pressure

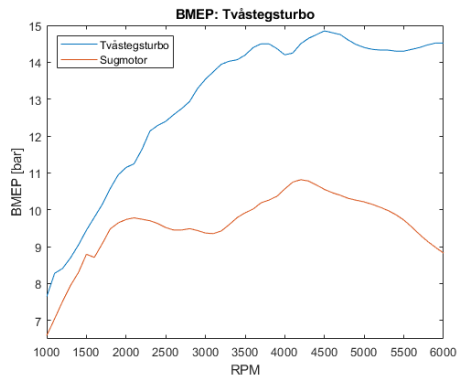
Figur 16-19 visar break mean effective pressure för de olika turbokonfigurationerna. Från dessa kan samma observationer som i avsnitt 4.1 göras då trendlinjerna är identiska. Detta beror på att BMEP är beroende av vridmomentet enligt ekvation (2). Eftersom BMEP är ett mått på hur effektivt motorn producerar arbete finns det en markant jämlighet mellan dessa två mätningar. Därför kommer båda mätningar att visa samma trendlinje men med olika värden då BMEP mäts i bar och vridmoment i newtonmeter [Nm].



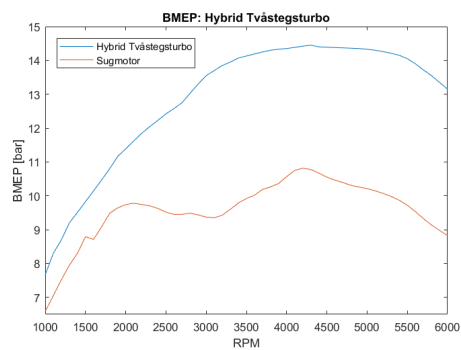
Figur 16: BMEP för konventionell turbo och sugmotor



Figur 17: BMEP för hybridturbo och sugmotor



Figur 18: BMEP för tvåstegsturbo och sugmotor

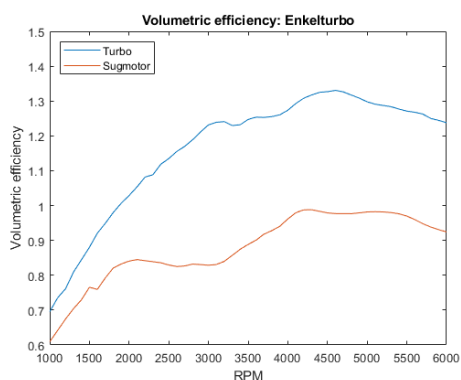


Figur 19: BMEP för tvåstegs hybridturbo och sugmotor

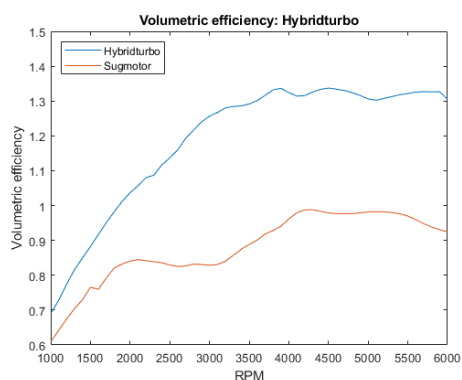
## 4.5 Volumetric efficiency

Figur 20-23 visar volumetric efficiency för de olika turbokonfigurationerna. Alla modeller har högre värden för volumetric efficiency än sugmotorn. Alla kurvor har samma startvärde 0,7 vid 1000 RPM och landar till slut på värden mellan 1,3 och 1,45 vid 6000 RPM. Figur 20 visar att den konventionella enkla turbomodellen har det lägsta värdet ungefär 1,24 vid 6000 RPM däremot ser man från figur 22 att tvåstegsturbon uppnår det högsta värdet 1,43 vid 6000 RPM.

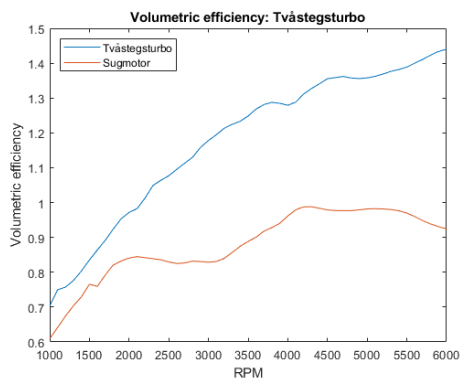
Från figur 20 och 21 kan man observera att kurvorna ser nästan likadana ut vid låga varv men vid höga varv börjar skillnaden sticka ut. Hybridturbokurvan håller sig relativt konstant vid höga varv, kurvan för tvåstegsturbon ökar genom hela intervallet. Värdena för enkelturbon och tvåstegshybrid modellen minskar istället vid 5500 RPM.



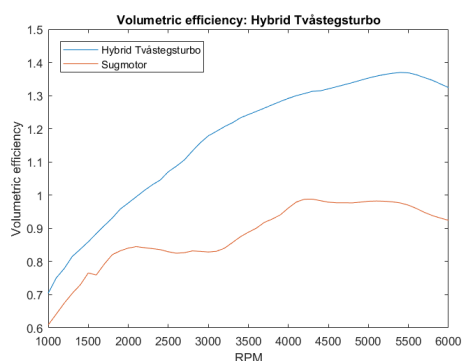
Figur 20: Volumetric efficiency: Konventionell turbo



Figur 21: Volumetric efficiency: Hybrid enkelturbo



Figur 22: Volumetric efficiency: Tvåstegsturbo



Figur 23: Volumetric efficiency: Hybrid Tvåstegsturbo

## 5 Diskussion

I det här avsnittet diskuteras de resultat som tagits fram ur GT-POWER. En jämförelse mellan de olika konfigurationerna samt en utvärdering av GT-POWER, avgränsningar och en vidareutveckling kommer diskuteras.

### 5.1 GT-POWER

Vid konstruering av modellerna i GT-POWER justerades alla motorkomponenters parametrar manuellt, vilket gör att det finns många potentiella felkällor som kan komma att påverka resultaten. I kombination med detta samt de enskilda komponenternas komplexitet, krävdes det därför att gruppen tänkte utanför instruktionsmanualen. I situationer där problem uppstod fanns det begränsad information att tillgå online, dock fanns möjligheten att via e-post kontakta GT-POWERs support. Vid e-post kontakt är det dock svårt att kommunicera exakt vad problemet är vilket gjorde detta till en utmaning. Ett problem som uppstod var att tvåstegs hybridturbon optimerades på ett annat sätt än de andra turbokonfigurationerna. Den optimerades istället för att vara så realistisk som möjligt och ha jämnare kurvor. Problemet uppstod på grund av kommunikationsfel i gruppen.

### 5.2 Vridmoment

Figur 4 bekräftar att turbokonfigurationen ger mer vridmoment än en sugmotor, vilket är förväntat. Däremot visar Figur 5 en mer intressant bild över hur mycket vridmoment man vinner över en konventionell sugmotor med hjälp av en hybridturbo. Till att börja med visar hybridturbon att den ger mer vridmoment än en sugmotor precis som för en enkelturbo. Det visas också att hybridturbon uppnår ett högre vridmoment än den konventionella enkelturbon på ungefär 230 Nm jämfört med 220 Nm för enkelturbon. Detta kan förklaras med att hybridturbon får hjälp utav elkraftkällan för att spola upp och skapa ett högre övertryck på låga varv. Därmed blir det enklare att vidare uppnå högre RPM och få ut ett högre vridmoment.

Figur 6-7 visar skillnaderna mellan tvåstegsvarianterna för en vanlig och en hybridturbo. Båda turbokonfigurationer visar en liknande lutning i graferna. Där de skiljer sig är vid högsta punkten. För tvåstegsturbon är kurvan väldigt ojämn vilket medför en sorts opålitlighet. Vridmomentet kan alltså variera relativt mycket mellan vissa varvtal vilket kan resultera i ryckiga och opålitliga köregenskaper. För tvåstegshybridturbon är grafen istället väldigt jämn. Vid vanlig körning är det ineffektivt att försöka få ut så mycket kraft från motorn som möjligt, framförallt ur ett miljöperspektiv. Därmed är det mer önskvärt att progressivt öka vridmomentet istället för att försöka utnyttja hela motorns kapacitet så snabbt som möjligt. Kompressorsidan är dessutom påverkad av en extern elkraftkälla, därmed blir utgående vridmoment en biprodukt av både avgaser och genomtänkt teknologi istället för bara ett opålitligt energiflöde från avgaserna. Bilens förmåga att accelerera och utföra arbete ökar med vridmomentet, vilket är önskvärt då det tillåter säkrare omkörningar och förbättrar dragförmågan.

### 5.3 Effekt

Från Figur 8-11 ser man tydligt att motorer som använder sig av någon form av turbokonfiguration helt klart producerar mer effekt än en motor utan turbo. Detta är helt väntat och därför inte särskilt intressant resultat, det bekräftar mest att simuleringsmodellerna fungerar som de ska.

En observation från Figur 8 och 9 som däremot är intressant är det faktum att turbokonfigurationen med en enkel hybridturbo uppnår en högre maxeffekt än turbokonfigurationen med en enkel konventionell turbo. Maxeffekten uppnås vid väldigt höga varvtal och är därför inte särskilt relevant för exempelvis vanlig landsvägskörning utan mer relevant för motorer som arbetar på högre varvtal, exempelvis formel 1 motorer med max varvtal närmare 15000.

Vid observation av Figur 10 och 11 syns tydligt att båda tvåstegskonfigurationerna har högre maxeffekt än enkelturbokonfigurationerna, detta är eftersom dessa använder sig av en större tur-

boladdare i slutet som kan producera mer överladdning och även dessa har sin maxeffekt vid relativt höga varvtal. Effekten vid låga varvtal är dock väldigt lika för alla fyra turbokonfigurationerna.

Det främsta syftet med att använda sig av en tvåstegsturbo är för att eliminera turbo lag vid låga varvtal. Från Figur 10 och 11 ser man dock tydligt att av användning av tvåstegsturbos ger en brantare effektkurva samt en högre maxeffekt jämfört med turbokonfigurationerna med enkel turbo.

## 5.4 Break specific fuel consumption

Vanliga varvtal vid landsvägskörning är 1500-3000 varv beroende på utväxling och hastighet. För personbilar är därför resultat inom detta intervall mest intressant att utvärdera. När turbomotorn börjar producera övertryck minskar BSFC som en följd av detta. Det blir vid samma varvtal högre verkningsgrad då friktionsförlusterna är densamma som sugmotorn vid ett specifikt varvtal. Resultatet syns tydligt i Figur 12 där BSFC blir lägre för den konventionella enkelturbokonfigurationen mellan 2000 och 3500 varv.

I Figur 13 som visar kurvan för enkelhybridturbon blir BSFC ännu lite lägre än för turbomotorn då ett högre övertryck kan uppnås på lägre varvtal. Det är dock viktigt att påpeka att förlusten som uppstår i omvandlingen av mekanisk energi till elektrisk energi som används för att driva turbon på låga varv inte ingår i detta projektet.

Tvåstegsturbon i Figur 14 har lägre värde för BSFC vid varv högre än 2500. En rimlig förklaring till detta kan vara det ökade motståndet vid låga varvtal då två turboaggregat ska drivas istället för ett. På liknande sätt beter sig Hybridtvåstegsturbon vilket Figur 15 visar, men eftersom den endast har en turbin håller sig BSFC lägre vid alla varvtal.

## 5.5 Break mean effective pressure

I Figur 16-19 ser man tydligt att all form av överladdning bidrar till ett högre BMEP. Det är ett väntat resultat då mer bränsle och syre med samma cylindervolym kan utföra ett större arbete. Hybridturbon i Figur 17 har en brantare lutning mot turbomotorn i Figur 16 då den får hjälp av elmotorn att skapa övertryck vid lägre varvtal. Tvåstegsturbon når ett högre maximalt BMEP-värde då den kan använda en större turbo för högre varvtal som kan tillföra mer syre in i motorn. Detsamma gäller för Hybridtvåstegsturbo i Figur 19 men där ökar BMEP jämnare då optimeringen är annorlunda för denna konfiguration.

## 5.6 Volumetric Efficiency

Figur 20-23 visar att alla modeller är effektiva, betydligt effektivare än sugmotorn, värden på modellerna är märkbart högre än sugmotorns värde. Detta är väntat eftersom alla turbokonfigurationer tillåter en större mängd syre in i motorn, vilket gör att mer bränsle kan förbrännas på samma volym vilket i sin tur leder till högre "Volumetric efficiency". Modellerna för hybridtvåstegsturbo och konventionell tvåstegsturbo har högre värde än de andra modellerna på höga varvtal. Anledningen till detta är att den större turbon effektiviserar förbränningen vid höga varvtal till skillnad från enkelturbomodellerna som inte klarar av att komprimera lika mycket luft vid höga varvtal. Dock visar enkelturbomodellerna i Figur 20-21 brantare kurvor vid låga varvtal än den konventionella tvåstegsmodellen och detta kan förklaras med att det första steget i tvåstegsturbomodellerna har ett mindre turboaggregat och därmed förs mindre luft in i motorn vilket leder till mindre luft-bränsleblandning.

Jämför man enkelturbomodellerna i Figur 20 och 21 ser kurvorna nästan likadana ut vid låga varv. Vid höga varvtal blir det tydligt att hybridturbon är effektivare. Det här kan spåras till elmotorn i hybridturbomodellen där elkraft fungerar som ett pålitligare drivmedel än avgaser. Figur 22-23 visar att tvåstegsmodellernas kurvor uppför sig likt varandra vid låga varv. Detta är förväntat med tanke på att båda modellerna har samma turboaggregat. Vid 5500 RPM har kurvan



för hybridtvåstegsturbons en nedgång medan den konventionella tvåstegsturbons kurva fortsätter att öka, detta kan kopplas till den mer realistiskt optimerande hybridtvåstegsturbomodellen där BMEP-värdena sjunker efter 5500 RPM.

## 5.7 Vidareutveckling

Ett mål är att i simuleringarna få fram så jämna kurvor som möjligt, detta uppnådes i Figur 7. Det var den enda modellen som optimerades på ett verkligt sätt då dom andra var optimerade för att få ett så högt BMEP-värde som möjligt. Jämnare kurvor innebär säkrare resultat att jämföra och tillåter att göra en mer verklighetstrogen slutsats.

För vidareutveckling av arbetet kan olika körcyklar simuleras med syfte att precisera den bästa turbokonfigurationen för olika användningsområden. Resultat hade även varit mer verklighetstroget om en generator som laddar batteriet vid varvtal då turboladdaren inte utnyttjas implementeras i hybridturbomodellerna. För en mer generell slutsats hade även flera typer av motorer kunnat testats som exempelvis en sexcylindrig motor.

Motorn som användes för alla simuleringar togs från GT-POWER. Den var färdigbyggd och dimensionerad enligt ett handledningsexempel i programvaran. Detta innebär dels att motorn inte var byggd för att anpassa sig till turboladdare men också att resultaten påverkas på grund av det. Vid ett nytt försök hade motorn kunnat byggas upp från grunden för att säkerställa att alla komponenter är dimensionerade för överladdare vilket hade kunnat leda till ett säkrare resultat.

## 6 Slutsats

I det här projektet var målet att utreda huruvida en motor med någon form av turbokonfiguration är bättre än en sugmotor utan turbo. För att utvärdera detta användes GT-POWER för att jämföra vridmoment, effekt, BMEP, BSFC och volumetric efficiency.

Från BSFC-resultaten kan man se att i intervallet 1500-3000 RPM, vilket är varvtalen de flesta personbilar oftast kör i, är värdena för BSFC nästintill identiska. Detta gör att för det nämnda intervallet är bränsleförbrukningen ungefär samma för alla turbokonfigurationer som testades. Resultatet visar dock att sugmotorn har något högre bränsleförbrukning i det fallet. Slutvärdena för de båda enkelturbokonfigurationerna är högre än både sugmotorn och de båda tvåstegskonfigurationerna. Detta tyder på en högre bränsleförbrukning för dessa konfigurationer. Det ska dock tilläggas att för de båda tvåstegskonfigurationerna är kurvorna ojämna vilket gör dem till en potentiell felkälla.

Alla turbokonfigurationer ger högre effekt än sugmotorn. Vid jämförelse av de olika turbokonfigurationerna är slutvärdena för de båda tvåstegskonfigurationerna högre än för enkelkonfigurationerna. Detta tyder på att det är möjligt att köra snabbare med dessa konfigurationer. Dock så är effekten i intervallet 1500-3000 RPM relativt lika för de olika konfigurationerna.

En konventionell turbo och hybridturbo har vissa fördelar och nackdelar. En hybridturbo kräver ström för att kunna hjälpa till att spola upp turbon. Den tar också upp ett större utrymme än en konventionell turbo och kräver därför att motorutrymmet dimensioneras om. Å andra sidan kan motorn optimeras för bra köregenskaper och hjälpa till med att eliminera olämpliga egenskaper som en konventionell turbo ger motorn. En konventionell turbo har funnits länge och har därför kommit längre i utvecklingen. Detta innebär att komponenterna i turbon är bättre optimerade vilket gör att dagens turboladdare är väldigt användbara.

Utvecklingen idag tyder på att bilindustrin är i en övergång från rena förbränningsmotorer till miljövänligare alternativ, bland annat hybrid- och elmotorer. Därmed är det användbart att vidareutveckla motorer med hybridturbo. Då merparten av dagens bilar enbart har förbränningsmotorer, hade ett kortsiktigt mål varit att fortsätta utvecklingen av konventionella turboladdare för implementering i dagens motorer. Långsiktigt är det klart bättre att fokusera på vart bilindustrin är på väg, ett led i detta skulle kunna vara att implementera hybridturbos till förbränningsmotorer.

Vid iakttagande av vridmoment, BMEP, BSFC och effekt observeras att tvåstegshybridturbon har bäst egenskaper. Enligt graferna hade tvåstegshybridturbon en vridmoment- och BMEP-kurva som ger önskvärd körkaraktäristik vid vardaglig körning. Likt vridmomentkurvan producerar den här konfigurationen en nästan linjär effektkurva också. Vid en närmare undersökning av BSFC har den här konfigurationen lägst bränsleförbrukning vid körintervallet 2000-3500 RPM och därmed är tvåstegshybridturbon det miljövänligare valet. Däremot har den likvärdigt volumetric efficiency jämfört med de andra. Den lilla skillnaden sinsemellan varianterna är inte stor och beror på optimeringskillnader, därför har den för liten påverkan för att ändra det totala slutresultatet.

# Referenser

## Tryckt Litteratur

John B. Heywood. (1988). Internal Combustion Engine Fundamentals. New York City: McGraw-Hill, Inc

## Websidor

Audi. Electric biturbo. Hämtad 2020-02-10.

[https://www.audi-technology-portal.de/en/mobility-for-the-future/audi-future-lab-mobility\\_en/audi-future-engines\\_en/electric-biturbo](https://www.audi-technology-portal.de/en/mobility-for-the-future/audi-future-lab-mobility_en/audi-future-engines_en/electric-biturbo)

Chaudhry, Bharat. (2014-05-12). Kinetic Energy Recovery system no longer used in Formula 1. Hämtad 2020-05-01.

<https://www.sportskeeda.com/f1/kinetic-energy-recovery-system-formula1>

Engineering Explained. (2017). The Pros And Cons Of Turbochargers Vs Superchargers. Hämtad 2020-02-02. <https://www.carthrottle.com/post/engineering-explained-the-pros-and-cons-of-turbochargers-vs-superchargers/>

Garret. (2019). 48V Electric Compressor for Mild Hybrid Vehicles. Hämtad 2020-01-26.

<https://www.garrettmotion.com/electric-hybrid/garrett-e-turbo/download-e-turbo-whitepaper/>

Harris, William. 2006-01-24. How Superchargers Work. Hämtad 2020-02-04.

<https://auto.howstuffworks.com/supercharger.htm>

Kirsten, Elise. (2017-09-04). Types of Turbochargers. Hämtad 2020-02-01.

<https://www.leisurewheels.co.za/blogs/types-of-turbochargers-2/>

Nationalencyklopedien. (2020). ottomotorn. Hämtad 2020-02-27.

<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/enkel/ottomotor>

Patrascu, Daniel. (2018-05-06) Formula 1 Energy Recovery System Explained. Hämtad 2020-04-20.

<https://www.autoevolution.com/news/formula-1-energy-recovery-system-explained-125488.html>

Petranay, Mate. (2014-01-14). How Formula One's Amazing New Hybrid Turbo Engine Works. Hämtad (2020-02-08).

<https://jalopnik.com/how-formula-ones-amazing-new-hybrid-turbo-engine-works-1506450399>

Turbosmart. History of turbocharging. Hämtad 2020-02-05.

<https://www.turbosmart.com/news/history-of-turbocharging/>

Wikipedia. (2018-11-06). Hybrid Turbocharger. Hämtad 2020-04-10.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Hybridturbocharger>

Wilson, Bill. (2014-07-20). Building Horsepower: the Pros and Cons of Turbochargers. Hämtad 2020-05-12

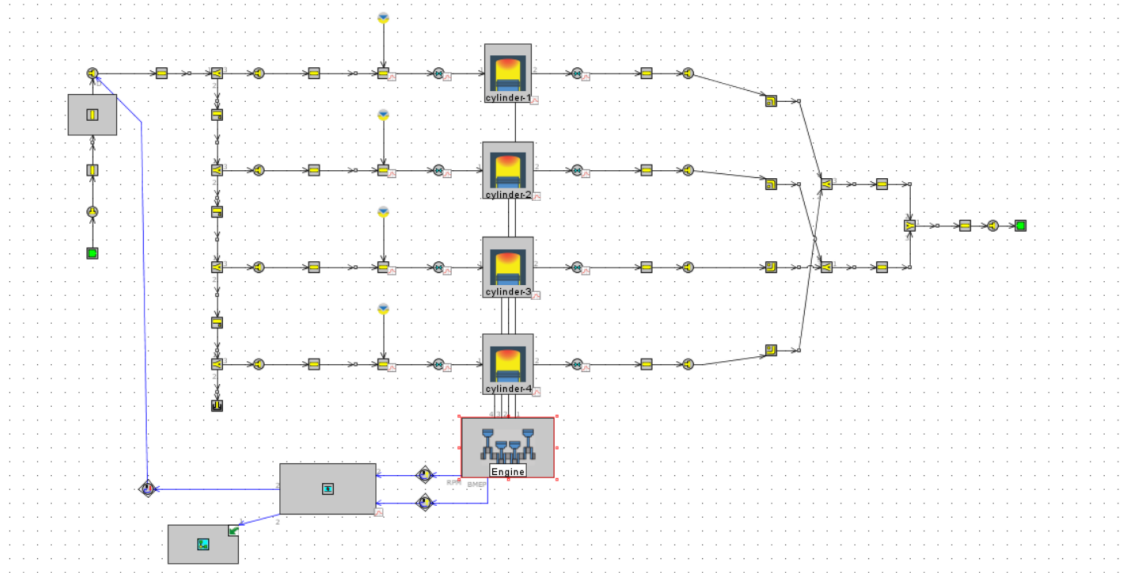
<https://www.motor1.com/news/73039/building-horsepower-the-pros-and-cons-of-turbochargers/>

Woodford, Chris. (2020-01-06). How turbochargers work. Hämtad 2020-02-06.

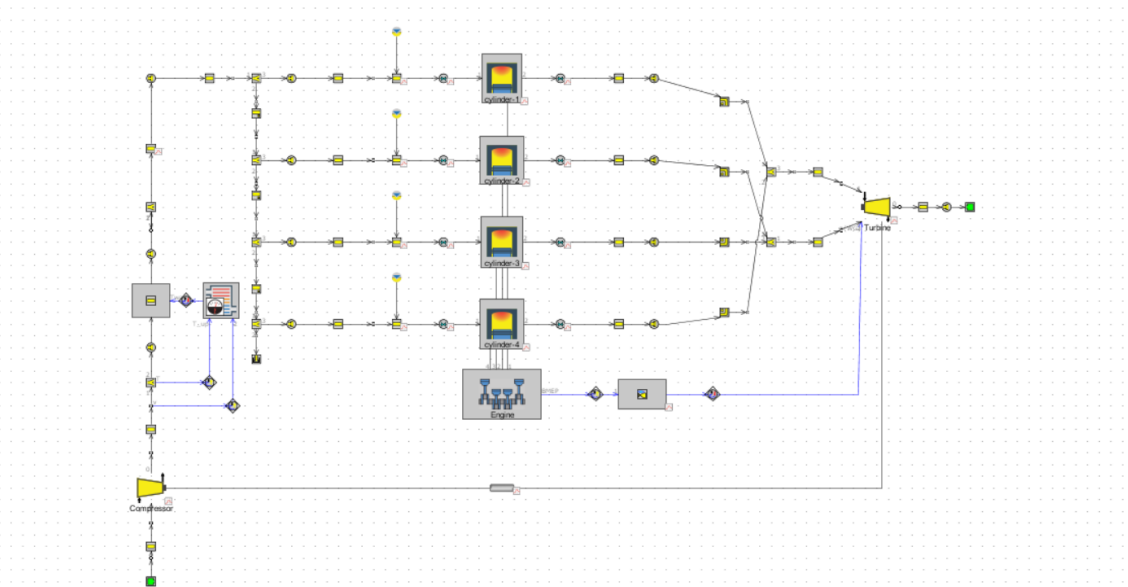
<https://www.explainthatstuff.com/how-turbochargers-work.html>

# A GT-POWER modeller

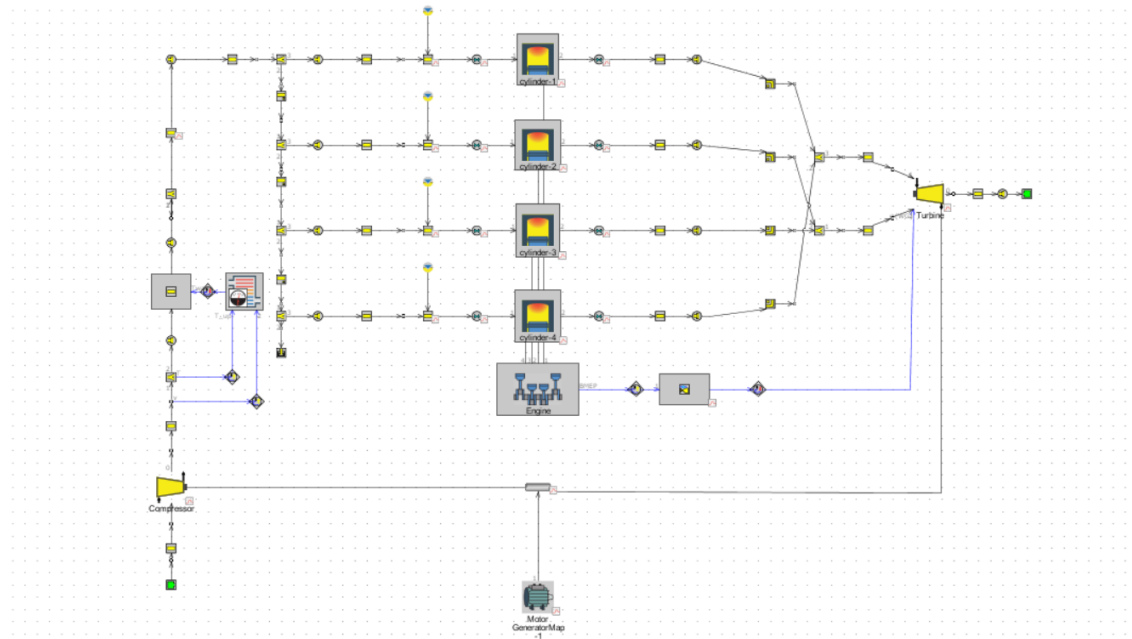
## A.1 Modell för sugmotor



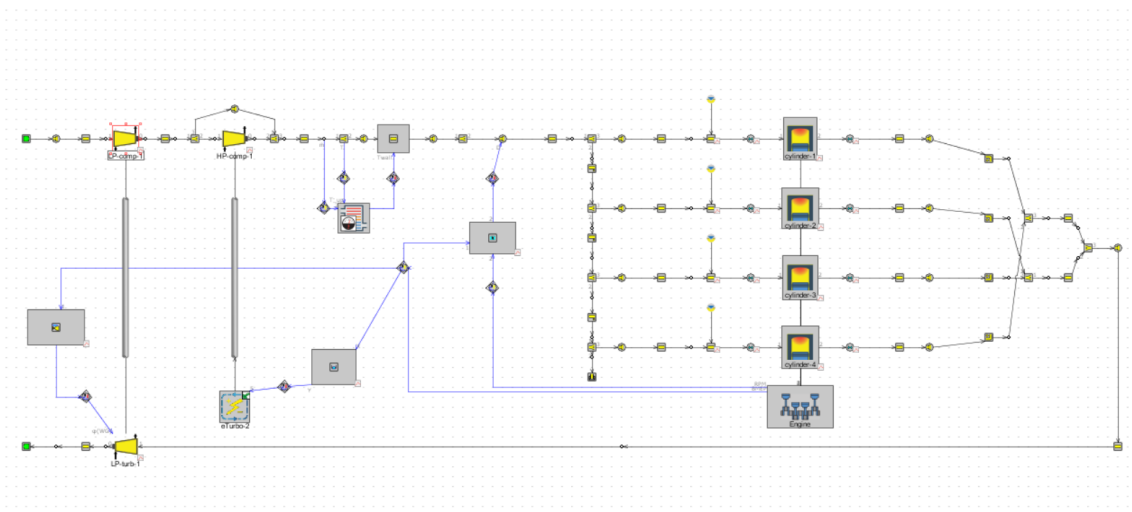
## A.2 Modell för enkel turbo



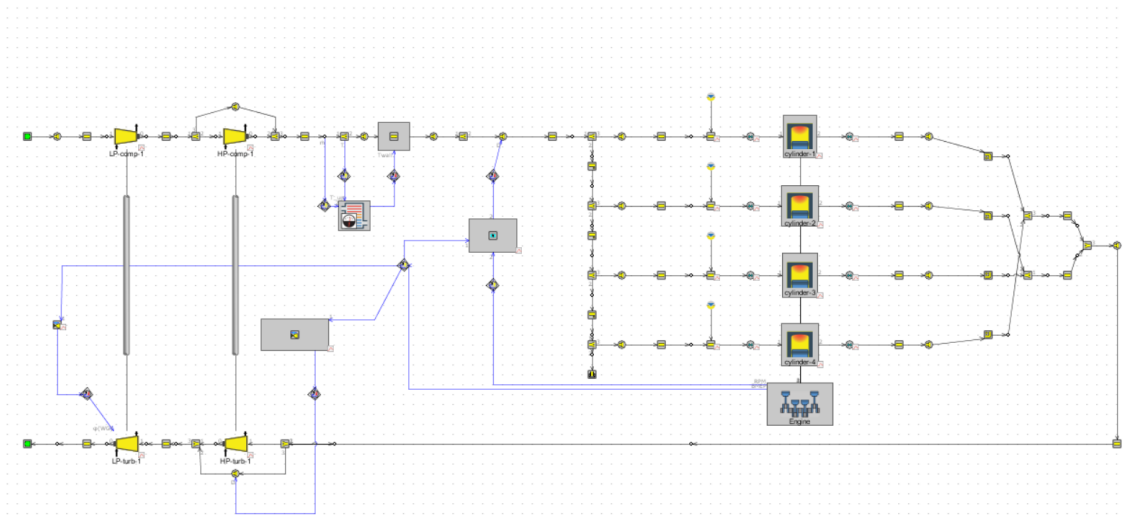
### A.3 Modell för hybridturbo



### A.4 Modell för hybrid tvåstegsturbo



## A.5 Modell för tvåstegsturbo



**INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH  
MARITIMA VETENSKAPER  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**  
Göteborg, Sverige 2020  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



**CHALMERS**