

Kandidatuppsats i maskinteknik  
Institutionen för systemteknik, Linköpings Universitet, 2019

# **Insugstrycksreglering av turbomotoriserade dragracingmotorcyklar**

**Kalle Torniainen**



Kandidatuppsats i maskinteknik

**Insugstrycksreglering av turbomotoriserade dragracingmotorcyklar**

Kalle Torniainen

LiTH-ISY-EX-ET--19/0489--SE

Handledare: **Max Johansson**

ISY, Linköpings universitet

Examinator: **Prof. Lars Eriksson**

ISY, Linköpings universitet

Fordonssystem

Institutionen för systemteknik

Linköpings universitet

SE-581 83 Linköping, Sverige

## Sammanfattning

Vid acceleration från stillastående med en turbomotoriserad dragracingmotorcykel behöver motorcykelns insugstryck regleras. Om regleringen av insugstrycket inte lyckas uppstår en okontrollerad och hastig ökning av insugstrycket. En för hastig ökning av insugstrycket leder till att vridmomentet från motorn ökar snabbare än önskat. Konsekvenserna av en för hastig vridmomentökning blir att motorcykelns framhjul lyfter eller att motorcykelns bakhjul tappar greppet mot banan och spinner loss. I rapporten testas, simuleras och jämförs både nya och gamla koncept för att reglera insugstrycket i startögonblicket. Konceptet som i beslutsmatrisen fick högst viktad summa visade i utförda test god förmåga att reglera insugstrycket. Konceptet med högst viktad summa var koncept A. Koncept A använder sig av mottrycket i wastegatehatten som återkoppling till styrenheten. Hårdvaran som används i koncept A är en pneumatisk wastegate-ventil med två solenoider.

## Abstract

When accelerating from standstill with a turbo engine drag racing motorcycle the intake pressure of the motorcycle needs to be controlled. If the intake pressure is not successfully regulated the intake pressure will increase rapidly. An increase of the intake pressure which is too rapid will result in a quick torque increase. A rapid torque increase creates handling problems such as front wheel lift or loss of grip at the rear wheel. This report includes testing, simulation and comparison between different concepts of intake pressure regulation. The concept which scored the highest score in the decision matrix showed great performance in the conducted tests. The concept scoring the highest amount of points in the decision matrix was concept A. Concept A uses the pressure in the wastegate in a closed loop system. The hardware used in concept A is a pneumatic wastegate valve with two solenoids.

## Innehåll

Sammanfattning .....	3
Abstract .....	3
Inledning.....	7
Syfte .....	7
Frågeställning .....	8
Teori.....	8
Komponenter.....	8
Turbo .....	8
Wastegate:.....	11
Metod .....	12
Simuleringar med motormodell .....	12
PI regulator med återkoppling från insugstryck .....	13
Beslutsmatris .....	13
Enkät.....	14
Koncept .....	14
Koncept som används idag:.....	14
Reglering av insugstryck med insugstryck som referens med pneumatisk wastegate och en solenoid. (Referenskoncept).....	14
Reglering av insugstryck med wastegatehattens mottryck som referens och återkoppling med pneumatisk wastegate och två solenoider. (Koncept A).....	16
Förbättringar/framtida koncept .....	16
Turbohastighetsstyrenhet .....	16
Pneumatisk eller elektrisk wastegate -ventil.....	17
E-throttle .....	17
Wastegate-ventil på insugssidan .....	17
Resultat .....	18
Enkät.....	18
Simuleringar.....	19
Data från test .....	24
Beslutsmatris .....	24
Diskussion.....	25
Simuleringar motormodell Simulink: .....	25
Data från test .....	25
Beslutsmatris .....	25
Framtida arbete .....	27

Slutsats .....27

Referenslista:.....28



## Inledning

Sporten dragracing är en accelerationstävling från stillastående till mållinjen som är 402,33 meter ifrån startlinjen. Det fordon som är först över mållinjen vinner. Fordonen som används i dragracing är bilar och motorcyklar med mycket effekt i sina motorer. En stor andel av motorerna som används är överladdade och i många fall sker överladdningen med hjälp av en turbo eller två turboaggregat.

Sättet som motorerna används på skiljer sig från hur motorer i bilar och motorcyklar används i det vardagliga livet. Under en vanlig startprocedur inom dragracing står fordonet stilla på startlinjen på höga varvtal för att sedan rivstarta när grönt ljus visas. Med icke överladdade fordon är startproceduren inget problem, däremot kan det uppstå problem vid rivstarten för fordon med turbomotorer. Problemen som kan uppstå för fordon med turbomotorer är att den snabba ökningen av motorvarvtal som sker när kopplingen sliras vid rivstarten även ökar insugstrycket för snabbt. En för aggressiv ökning av insugstryck innebär att momentökningen från motorn blir för hög på för kort tid. En okontrollerad momentökning leder till att fordonet går upp på bakhjulen eller förlorar fästet och spinner loss de drivande hjulen. Inget av scenariona är önskvärda i en sport där varje hundradel av en sekund är avgörande.

### Syfte

I rapporten undersöks vilken typ av insugstrycksreglering och vilken hårdvara som är mest lämpad för insugstrycksreglering på motorcyklar i tävlingsklassen SSB (Super Street Bike). SSB-motorcyklarna har turbomotorer oftast inom storleksintervallet 1000 cc – 1500 cc. Motorernas effekt är i de flesta fall över 550 hästkrafter. Med så starka motorer är det viktigt att kontrollera ökningen av moment till bakhjulet. Hur mycket momentet ökar beror på turbomotorcyklar till stor del på hur högt insugstrycket är. Styrenheten för Insugstryckreglering blir därför en kritisk komponent för att behålla kontroll över motorcykeln under körningens gång. I figur 1 visas Dag Wagenius SSB under en körning där momentet från motorn stigit för snabbt.



Figur 1: Misslyckad start med för mycket hjullyft

## Frågeställning

Vad är det som orsakar den aggressiva ökningen i insugstryck vid startögonblicket?

Vilken insugstrycksregleringsmetod är mest lämpad för dragracingmotorcyklar?

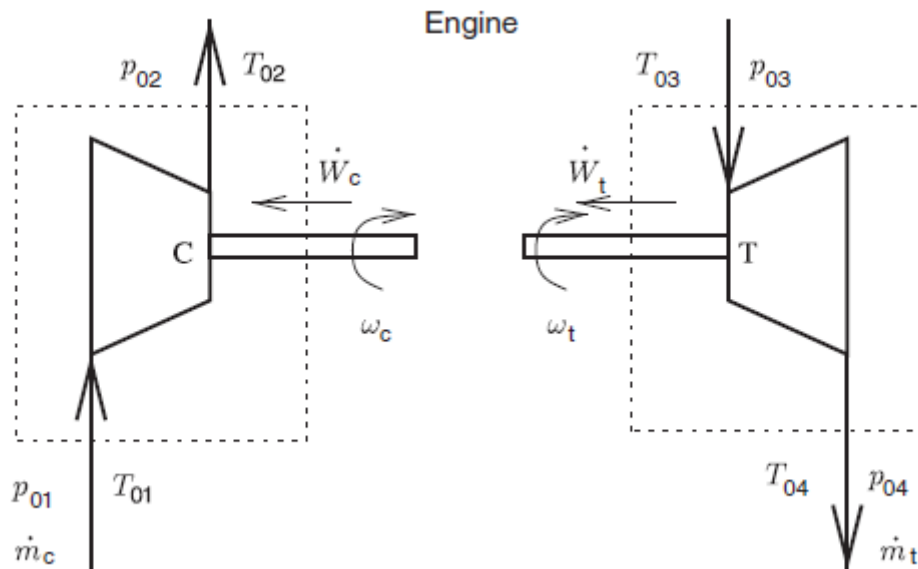
## Teori

### Komponenter

#### Turbo

En turbo består av en radalturbin, en centrifugalkompressor och en axel som kopplar samman turbinen och kompressorn. Turbinsidan av turbon omvandlar energi från motorns avgaser till en rotationsrörelse i den sammankopplande axeln. Kompressorn roterar, suger in luft och komprimerar luften innan luften lämnar turbon. Efter kompressorn flödar luften igenom intercoolern som kyler ner den komprimerade luften. När luften kylts ner i intercoolern flödar luften igenom insugsplenum, gasspjäll, insugskanal och in till förbränningskammaren. I förbränningskammaren förbränns luften tillsammans med bränsle. Förbränningsprocessen skapar avgaser som flödar ut genom avgasröret till turbons turbindel. I figur 2 illustreras turbons funktion schematiskt. Med ekvation 1 och 2 räknas turbinens och kompressorns effekter ut.





Figur 2: Schematisk bild över en turbo. Återanvänd med tillstånd av Lars Eriksson. (Eriksson & Nielsen 2014)

$$W_c = \dot{m}_c(h_{02} - h_{01}) = [c_p \text{ constant}] = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{02} - T_{01}) \quad (1)$$

$$W_t = \dot{m}_t(h_{03} - h_{04}) = [c_p \text{ constant}] = \dot{m}_t c_{p,t} (T_{03} - T_{04}) \quad (2)$$

I ekvation 1 finns variablerna effekt från kompressor  $W_c$ , massflöde i kompressor  $\dot{m}_c$ , entalpin innan kompressorn  $h_{01}$ , entalpin efter kompressorn  $h_{02}$ , den specifika värmekapaciteten  $c_{p,c}$ , temperaturen innan kompressorn  $T_{01}$  och temperaturen efter kompressorn  $T_{02}$ . Variablerna i ekvation 2 är effekten från turbinen  $W_t$ , massflödet i turbinen  $\dot{m}_t$ , entalpin innan turbinen  $h_{03}$ , entalpin efter turbinen  $h_{04}$ , den specifika värmekapaciteten  $c_{p,t}$ , temperaturen innan turbinen  $T_{03}$  och temperaturen efter turbinen  $T_{04}$ .

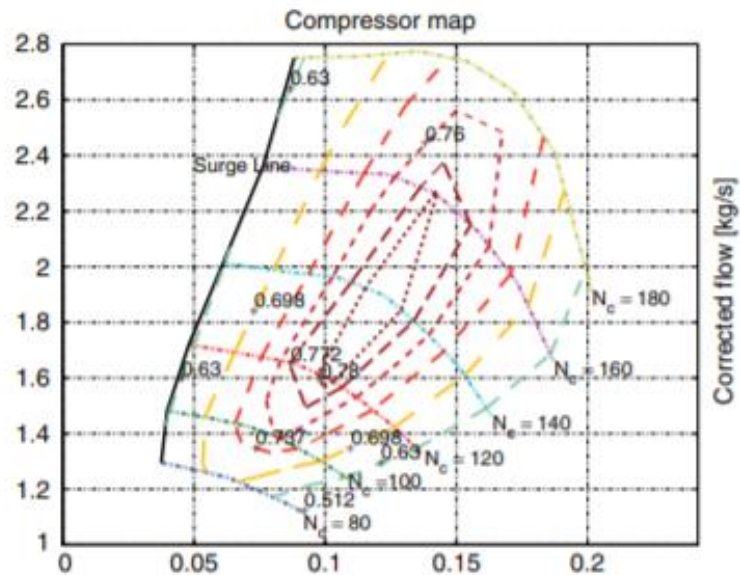
I figur 2 syns hur turbinen utvinner energi ur avgaserna till effekt på den sammankopplade axeln. Energiöverföringen sker genom att avgaserna expanderas i turbinen från den högre temperaturen  $T_{03}$  och det högre trycket  $p_{03}$  till temperaturen  $T_{04}$  och trycket  $p_{04}$ . Effekten på den sammankopplade axeln används av kompressorn på andra sidan av turbon för att komprimera insugsluften från det lägre trycket  $p_{01}$  och temperaturen  $T_{01}$  till det högre trycket  $p_{02}$  och temperaturen  $T_{02}$ . (Eriksson & Nielsen, 2014)

Kompressorn och turbinens storlekar har båda betydelse för hur turbon som system fungerar. Storleken på turbon och turbons komponenter behöver anpassas till motorn som används och användningsändamålet. En för stor turbo för motorn som turbon används med, kommer att ha svårigheter med att öka insugstrycket tillräckligt snabbt. En för liten storlek på turbon kan i sin tur leda till problem med att nå upp till det önskade insugstrycksvärdet.

Turbotillverkare testar turbon de tillverkar i en flödestestbänk. Datan från testet används för att skapa en kompressormapp och turbinmapp. Kompressormappen visar hur stor tryckkvoten blir och hur effektivt turbon arbetar vid olika turbovarvtal och massflöden.

Kompressormappen visar också vilka gränser som finns för användningen av kompressorn. Gränserna i kompressormappen är max turbovarvtal, surge, choking och restriktion.

. I figur 3 visas en kompressormapp.



Figur 3: Kompressormap. Figuren återanvänd med tillstånd av Lars Eriksson. (Eriksson & Nielsen 2014)

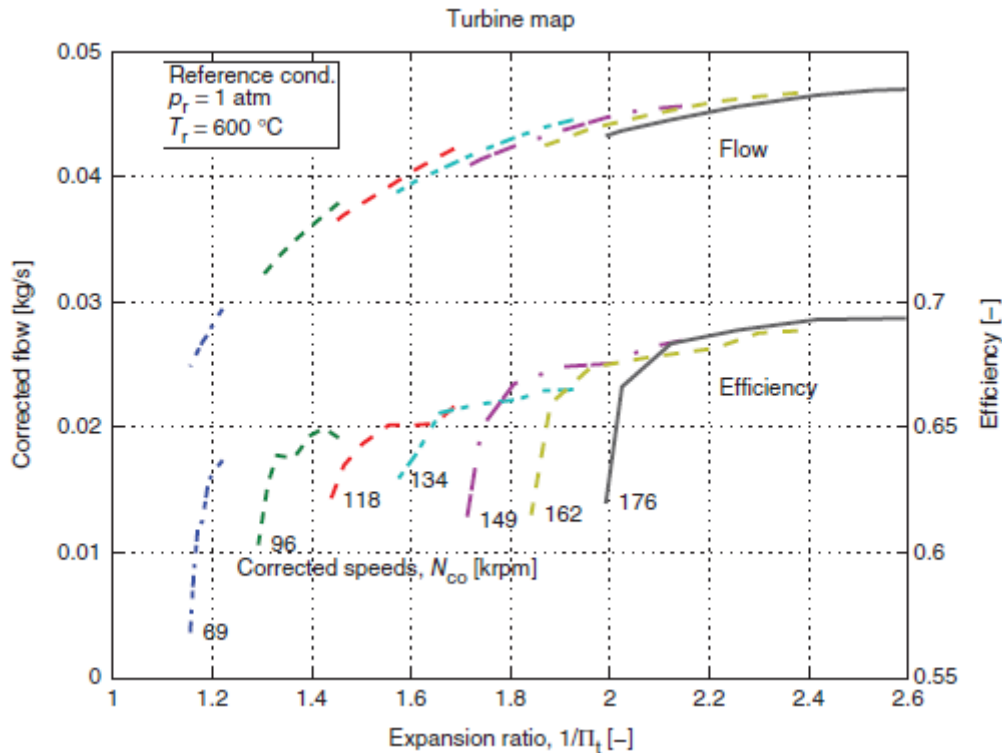
Y-axeln i figur 3 visar tryckkvot. Det maximala varvtalet för kompressorn är linjen längst upp till höger i figur 3. Om det maximala varvtalet för kompressorn överskrids finns risk för haveri och skador på turbon.

Surge-linjen är linjen till vänster i kompressormappen. Surge-området präglas av instabil operation av turbon. Det som skapar instabiliteten i flödet är en för hög tryckkvot jämfört med flödet. När kompressorn opererar i surge-området uppstår problem med att flödet i kompressorn vänder tillbaka, det tillbakavända flödet skapar oscillationer i både tryck och massflöde. Det instabila och oscillerande flödesbeteendet är farligt för turbon eftersom kompressorns komponenter belastas ojämnt. Den ojämn belastningen av komponenter kan leda till att turbon går sönder. (Eriksson & Nielsen 2014)

I området nere i högra hörnan av kompressormappen uppstår fenomenet choke. Choke innebär att det maximala flödet begränsas av att flödet kring någon komponent i kompressorn uppnår överljudshastighet. När kompressorn uppnått choke-tillstånd kan inte volymflödet ökas genom att öka turbons varvtal. (Hiereth & Prenninger 2007)

Den sista gränsen i kompressormappen är restriktionsgränsen. Restriktionsgränsen finns längst ner på kompressormappen där tryckkvoten är  $< 1$ . När kompressorn är inom restriktionsområdet beter sig kompressorn som en flödesrestriktion. Ett exempel på en situation där kompressorn kan hamna i restriktionsområdet är när en motor körs på låga motorvarvtal och turbovarvtal och sedan trycker fullt på gaspedalen.

Turbinmappen i figur 4 visar hur turbindelen av turbon fungerar vid olika expansionskvoter, avgasflöden, rotationshastigheter samt hur effektivt turbinen arbetar vid de olika punkterna. Expansionskvoten beräknas genom att dividera trycket  $p_{03}$  (tryck innan turbin) i figur 4 med trycket  $p_{04}$  (tryck efter turbin) i figur 4. (Eriksson & Nielsen 2014)



Figur 4: Turbinmapp som visar hur turbinen fungerar i olika lägen. Figuren återanvänd med tillstånd av Lars Eriksson. (Eriksson & Nielsen 2014)

### Wastegate:

En wastegate-ventil används för att reglera insugstryck i turbomotorer. Wastegaten sitter monterad på avgassidan av turbon och används för att styra avgaser ifrån turbinen. Genom att styra avgaser ifrån turbinen minskar wastegate-ventilen flödet till turbinen, vilket resulterar i minskad effekt från turbinen. Minskad effekt från turbinen leder till minskad effekt från kompressorn då turbinen och kompressorn är sammankopplad via en gemensam axel. (Eriksson & Nielsen 2014)

Det finns olika sätt att styra wastegate-ventilen. De två för dragracingapplikationer mest relevanta sätten att styra wastegate-ventilen är elektroniskt och pneumatiskt

#### *Pneumatisk wastegate*

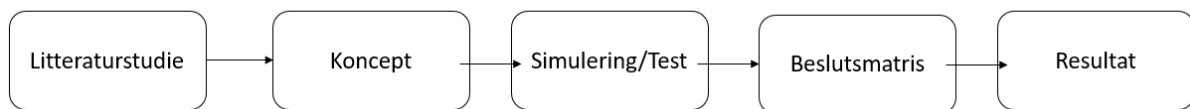
De pneumatiska wastegates som används i dragracing använder sig av fjäderkraft och lufttryck från en extern källa för att kontrollera ventilens rörelse.

#### *Elektronisk wastegate*

En elektronisk wastegate saknar till skillnad från en pneumatisk wastegate en fjäder. En elektronisk wastegate-ventil styrs istället hela vägen av ett servo som får en PWM (Pulse Width Modulation)-styrsignal från ECU (Engine Control Unit). Den elektroniska wastegaten har i de flesta fall en positionsgivare som skickar positionsdata till ECU.

## Metod

En litteraturstudie utfördes för att samla in information och kunskap om de olika koncepten för insugstrycksreglering och hur de fungerar i olika sammanhang. Parallellt med litteraturstudien utfördes simuleringar med hjälp av en motormodell. När informationen och data var insamlad analyserades datan och koncepten som ansågs vara intressanta gick vidare till beslutsmatrisfasen. Parametrarna kostnad, prestanda, användarvänlighet och svårighetsgrad att implementera styrenheten vägdes i beslutsmatrisen med resultat från simuleringarna, test, återkoppling från aktiva inom sporten och litteraturstudien som underlag. Koncepten tilldelades poäng och resultatet av beslutsmatrisen besvarade frågeställningen. Vilken insugstrycksregleringsmetod är mest lämpad för dragracingmotorcyklar? I figur 5 visas arbetets struktur.



Figur 5: Schematisk bild över examensarbetets struktur

## Simuleringar med motormodell

En motormodell användes för att utföra simuleringar av hypoteser. Syftet med simuleringarna är att förstå vad det är som skapar överskjutningen i insugstryck och hur överskjutningen kan elimineras. Motormodellen kördes i programmet Simulink. Modellen är skapad och utvecklad av professor Lars Eriksson på Linköpings Universitet. Motormodellen är ursprungligen modellerad efter en 1.8 liters fyrcylindrig turbomotor. Motormodellen är av typen Mean value engine model (MVEM).

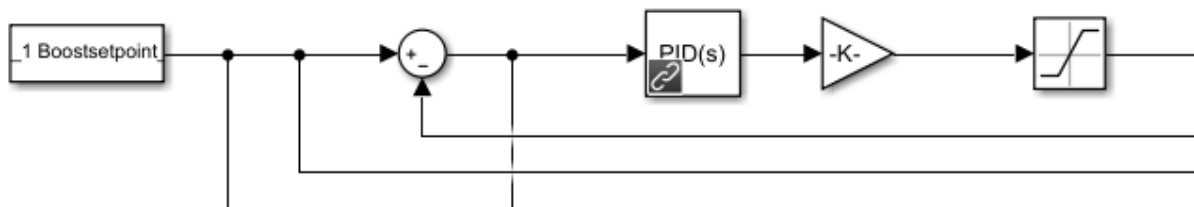
I simuleringarna i Simulink används en motorvarvtalskurva från en verklig körning av Dag Wagenius SSB. För att kunna använda motorvarvtalskurvan från en verklig körning med motormodellen som används i projektet skalades varvtalskurvan ner till de varvtal som passar den modellerade motorn. Faktorn som varvtalskurvan skalas ned med togs fram genom att turbons varvtal bevakades vid simuleringar som utfördes med olika skalningar på motorvarvtalskurvan. Simuleringarna påbörjades med skalningsfaktorn 0.95, skalningsfaktorn sänktes med 0.05 för varje simulering. Den första skalfaktorn (0.4) som inte tvingade in turbon i användningsområden där turbon hamnar i ett övervarvningssläge valdes som skalfaktorn för varvtalskurvan.

I och med att regleringsmetoderna som simuleras i rapporten använder insugstryck som referens, behövdes en önskad insugstryckskurva. Den önskade insugstryckskurvan som importerades till Simulink var från samma körning som motorvarvtalskurvan.

De första simuleringarna som kördes efter att all data importerats till Simulink utfördes med en helt stängd wastegate. En simulering med helt stängd wastegate kördes för att bekräfta att problemet med överskjutningar i insugstryck även uppkom i Simulink och inte bara i verkligheten.

### PI regulator med återkoppling från insugstryck

För att reducera problemet med överskjutning av insugstryck vid startögonblicket skapades en PI-regulator i Simulink. PI-regulatorn reglerar styrsignalen till wastegaten och får återkoppling från insugstrycket. PI-regulatorn i Simulink består av fem block som illustreras i figur 6. Insugstrycksreferensblocket, summeringsblocket, PID-blocket, förstärkningsblocket och signalmättnadsblocket. Insugstrycksreferensblocket innehåller en matris med önskat insugstryck för en viss tid. I summeringsblocket summeras det uppmätta värdet och det önskade värdet för insugstryck, differensen mellan värdena är lika med reglerfelet. I PID-blocket finns själva PID-regulatorn. I förstärkningsblocket skalas det som kommer ut från PID-blocket till en lämplig skala för wastegate-ventilens position. Signalmättnadsblocket används för att inte onormalt stora styrsignaler ska förekomma. Efter signalmättnadsblocket går styrsignalen till wastegate-ventilen. Styrsignalen styr wastegate-ventilens position. Signalen kan variera mellan 1 och 0, där 1 är helt stängd och 0 är helt öppen.



Figur 6: Schematisk figur över PI-regulatorn som används i Simulink för insugstrycksreglering

### Beslutsmatris

Pughs matris användes i syfte att jämföra de olika insugstrycksregleringskoncepten som undersöktes i rapporten. Pughs matris är en beslutsmatris där alla koncept tilldelas poäng i jämförelse med det för tillfället använda konceptet. Egenskaperna som koncepten poängsattes i var kostnad, prestanda, användarvänlighet och svårighetsgrad att implementera styrenheten. Referenskonceptet i matrisen var insugstrycksregleringsstyrenheten som Dag Wagenius använt sig av tidigare. I figur 7 illustreras beslutsmatrisen innan poängutdelning.

	Viktning	Referens	Koncept A	Koncept B	Koncept C
Prestanda					
Kostnad					
Implementering					
Användning					
Antal +					
Antal -					
Summa					
Viktad summa					

Figur 7: Beslutsmatris innan poängutdelning

Poängskalan för egenskaperna består av fem steg från -2 till +2. Om ett koncept blir tilldelat -2 betyder det att konceptet är betydligt sämre än referenskonceptet inom den egenskapen. Poängtilldelningen -1 innebär att konceptet är marginellt sämre än referenskonceptet. Om 0 tilldelas ett koncept anses konceptet vara jämligt referenskonceptet. Positiva poängtilldelningarna +1 och +2 värderas likadant som de negativa poängtilldelningarna med skillnaden att konceptet istället är marginellt bättre eller mycket bättre än referenskonceptet inom egenskapen som poängsätts.

### Enkät

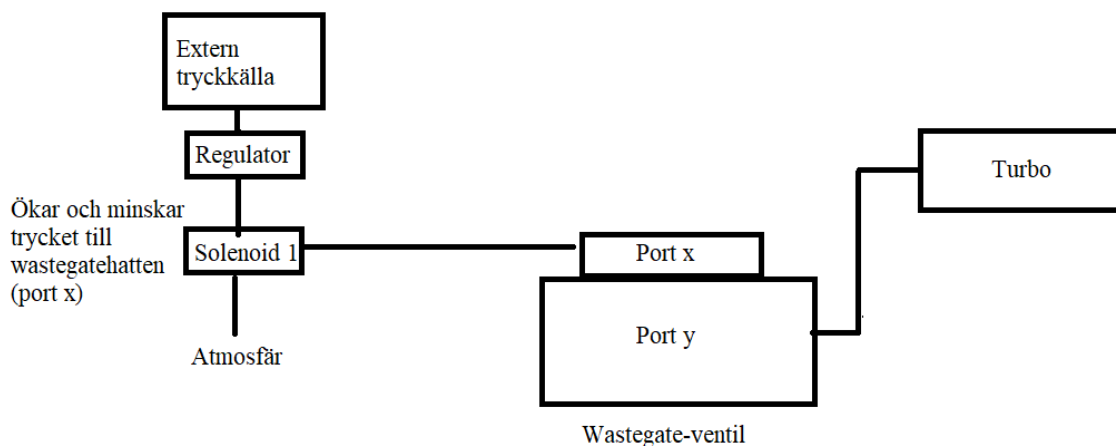
För att kunna vikta egenskaperna i beslutsmatrisen sinsemellan skickades en enkät ut till 15 aktiva (förare och mekaniker) inom tävlingsklassen Super Street Bike. I enkäten ombads teamen rangordna de tidigare nämnda egenskaperna kostnad, prestanda, användarvänlighet och svårighetsgrad att implementera styrenheten efter vilken egenskap de anser vara viktigast. Den viktigaste egenskapen multipliceras med faktor 1, den näst viktigaste med faktor 0.75, den tredje viktigaste med faktor 0.5 och den minst viktiga med faktor 0.25. Svaren från enkäten användes som underlag vid viktningen av beslutsmatrisen.

## Koncept

### Koncept som används idag:

Reglering av insugstryck med insugstryck som referens med pneumatisk wastegate och en solenoid. (Referenskoncept)

Ett av de vanligaste koncepten som används för reglering av insugstryck i SSB-klassen är en closed loop styrenhet som använder insugstrycket som återkoppling till styrenheten. Som wastegate används en pneumatisk wastegate-ventil som matas med lufttryck från en trycksatt flaska. En schematisk bild över konceptet visas i figur 8.

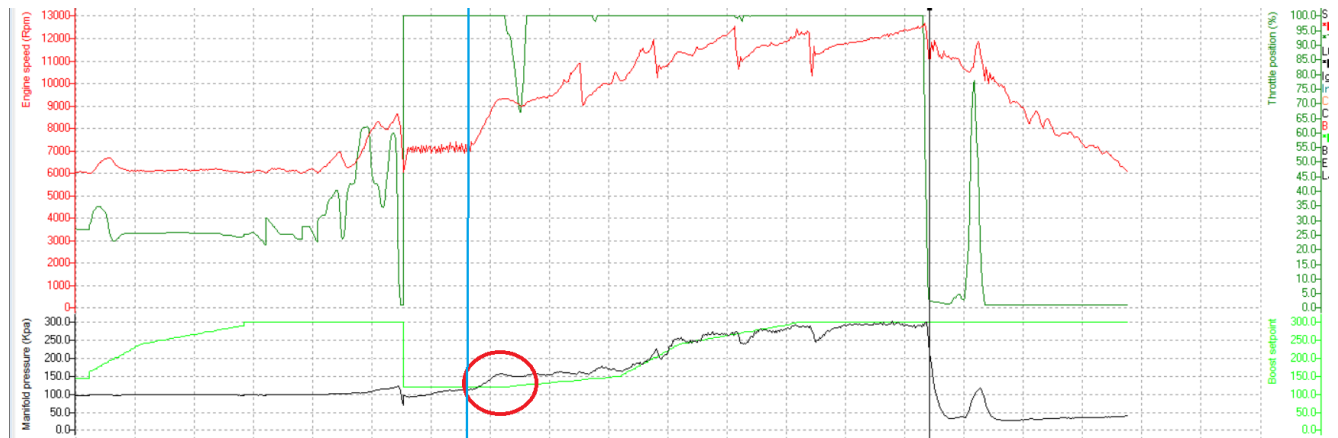


Figur 8: Schematisk överblick över referenskoncept

Insugstrycket från insugsplenumet leds in i port y där det agerar som en referens. Om insugstrycket är högre än trycket som kommer från den externa flaskan (går in i port x) kommer wastegaten att öppnas. Trycket från den externa flaskan regleras med en solenoid som tar emot en PWM-signal från ECU:n. PWM-signalen bestäms med hjälp av reglerfelet

mellan insugstrycket och referenssignalen för insugstrycket som har ställts in i ECU:n. PWM-signalen som skickas ut till solenoiden beror på hur stort reglerfelet är.

Detta koncept av insugstrycksreglering är det koncept som Dag Wagenius tidigare använt på sin SSB-motorcykel. Konceptet har trots många tester och olika inställningar inte kunnat uppnå den prestanda som önskats. Problemen som uppstått är att reglering av insugstrycket vid startögonblicket och cirka 3 sekunder framåt inte har lyckats hålla insugstrycket enligt önskat referensvärde. Insugstrycket skjuter över referensvärdet vid ögonblicket som kopplingshandtaget släpps och motorcykeln försätts i rörelse. I figur 9 visas data från en av Dag Wagenius körningar.



Figur 9: Data från Dag Wagenius SSB från en körning med referenskonceptet (pneumatisk wastegate-ventil med en solenoid och endast insugstryck som återkoppling)

Den röda kurvan visar motorns varvtal i RPM, den mörkgröna linjen över RPM illustrerar position för gashandtag. Det vertikala blå strecket markerar tidpunkten när kopplingshandtaget släpps och motorcykeln börjar röra på sig. Den svarta grafen är insugstryck i KPa och den gröna grafen är det önskade insugstrycket i KPa.

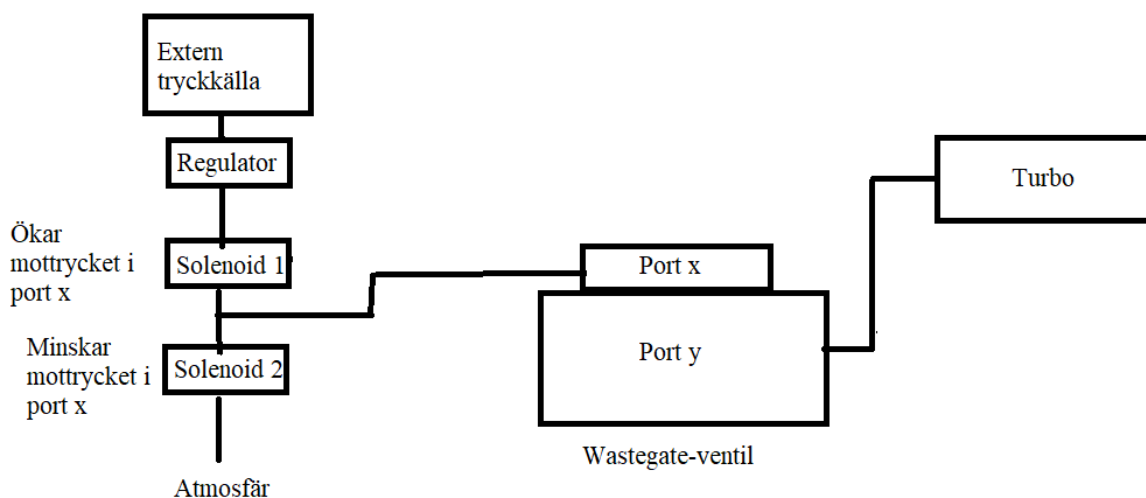
Problemet med konceptet där endast en solenoid används verkar vara att trycket som går till toppen av wastegatehatten inte blöds ut tillräckligt snabbt. När trycket till wastegatehatten inte blöds ut snabbt nog stannar wastegate-ventilens position i ett läge där wastegaten inte är tillräckligt öppen för att släppa förbi mängden avgaser som hade krävts för att hålla det önskade insugstrycket. Figur 8 visar att problemet med att hålla det önskade insugstrycket främst uppstår vid låga önskade värden på insugstryck. Vid högre värden på det önskade insugstrycket skjuter inte längre insugstrycket över det önskade värdet lika ofta och heller inte lika mycket som vid låga insugstryck. För att kontrollera hypotesen att trycket till wastegatehatten inte blöds ut snabbt nog skulle en trycksensor kunna monteras mellan solenoiden och toppen av wastegatehatten. Trycksensorn skulle visa tryckförändringen när insugstrycket håller på att skjuta över önskat värde.

Ett annat möjligt problem med konceptet är att endast insugstryck används som återkoppling. I (Holmbom, Liang & Eriksson 2017a) Förklarar författarna att om endast insugstryck används som återkoppling till styrenheten blir tidskonstanten från kommando för utförande till effekt i insugstrycket stor. Den stora tidskonstanten påverkar enligt Holmbom, Liang & Eriksson insugstrycksstyrenhetens dynamiska egenskaper negativt.



Reglering av insugstryck med wastegatehattens mottryck som referens och återkoppling med pneumatisk wastegate och två solenoider. (Koncept A)

Ett annat vanligt förekommande koncept för insugstrycksreglering inom dragracing är konceptet som använder sig av wastegatehattens mottryck som referens och återkoppling. Wastegate-ventilen som används är en pneumatisk wastegate-ventil som använder luft från en extern tryckluftsfaska för att bygga mottrycket i wastegatehatten. Två solenoider som likt referenskonceptet styrs med PWM-signaler används för att reglera trycket till wastegatehatten. En av solenoiderna ökar trycket och den andra solenoiden minskar trycket i wastegatehatten (port x). I figur 10 illustreras systemet schematiskt.



Figur 10: Schematisk överblick av koncept A

### Förbättringar/framtida koncept

I avsnittet förbättringar/framtida koncept presenteras vilka framtida förbättringar som skulle kunna implementeras i insugstrycksreglering för dragracingmotorcyklar. De framtida koncepten/förbättringarna är en del av resultatet från litteraturstudien som utfördes.

#### Turbohastighetsstyrenhet

Ett koncept som enligt författarens vetskap ännu inte använts i en kontrollstrategi för insugstrycksreglering av dragracingmotorcyklar är inkludandet av en turbohastighetsensor. Enligt (De Cesare et al. 2017) beror det på att turbohastighetsensorer tidigare varit dyra. De skriver också att dagens turbohastighetsensorteknik har gått framåt och blivit mer tillgängligt tack vare kostnadseffektiva sensorer.

Kontrollstrategier som använder sig av en turbohastighetsensor för insugstryckreglering har undersökts med lovande resultat. I (Holmbom, Liang & Eriksson 2017b) visar Holmbom, Liang och Eriksson att en insugstrycksstyrenhet som även använder sig av mätvärden från turbons hastighet reglerar insugstrycket snabbare och stadigare än en likvärdig insugstrycksstyrenhet som inte använder sig av turbohastighetsvärden. I (De Cesare et al. 2017) presenteras liknande resultat som Holmbom, Liang och Eriksson presenterat. Enligt De Cesare, Covassin, och Paiano presterar insugstrycksstyrenheten som använder turbohastighet som en del av styrningen bättre än styrenheten som endast använder



insugstryck som återkoppling. Författarna skriver i (De Cesare et al.2017) att styrenheten som använder sig av turbohastighet kan ha ett högre önskat värde på insugstryck vid ett stegsvar utan att skjuta över jämfört med enheten som inte använder turbohastighet.

I beslutsmatrisen som används i resultatdelen utvärderas ett insugstrycksregleringskoncept som använder både insugstryck och turbohastighet som återkoppling. Konceptet heter i beslutsmatrisen koncept C.

#### Pneumatisk eller elektrisk wastegate -ventil

I (Holmbom, Liang & Eriksson 2017a) undersöks prestandaskillnaden mellan en pneumatisk wastegate och en elektrisk wastegate. Holmbom, Liang och Eriksson skriver i rapporten att ett problem med pneumatiska wastegate-ventiler är osäkerheten kring ventilens position. De förklarar att osäkerheten över positionen beror på att en pneumatisk wastegate-ventil saknar funktionen att ge återkoppling på sin position. I rapporten framkommer även att pneumatiska wastegate-ventiler kan ha problem med att i vissa lägen och höga avgasttryck hålla positionen som efterfrågas av insugstrycksstyrenheten. Problemen beskrivna ovan leder till problem med regleringen av insugstryck på grund av att kontrollsystemet inte vet om wastegate-ventilen håller den efterfrågade positionen.

I beslutsmatrisen som används för att jämföra de olika koncept som undersöks i rapporten utvärderas ett koncept där den pneumatiska wastegate-ventilen i referenskonceptet byts ut mot en elektrisk wastegate-ventil. Konceptet kallas i beslutsmatrisen koncept B.

#### Elektronisk trottell

För att förmildra problemen med överskjutningen av insugstrycket skulle en E-throttle kunna användas. Genom att reglera vinkeln på gasspjället från vidöppen till delvis stängd minskar mängden luft/bränsle blandning som flödar genom spjälhuset in i motorns insugskanaler. Förminskningen av mängden luft/bränsle blandning leder till att motorns moment minskar. Minskat moment från motorn reducerar risken för att motorcykeln ska gå upp på bakhjulet eller tappa greppet genom att bakhjulet spinner loss.

I (Gorzelic et al. 2012) skriver författarna att motorns momentrespons är snabbare vid en ändring av gasspjällsvinkel jämfört med en ändring av wastegate-ventilens vinkel. I samma rapport testas en koordinerad insugstrycksregleringsmetod där både wastegate-ventil och elektroniskt gasspjäll används för att reglera insugstryck. Resultaten som presenteras i (Gorzelic et al. 2012) visar att den koordinerade regleringsmetoden med både wastegate-ventil och elektroniskt gasspjäll ger en snabbare respons på insugstryck vid ett stegsvar jämfört med en styrenhet som enbart har en wastegate-ventil.

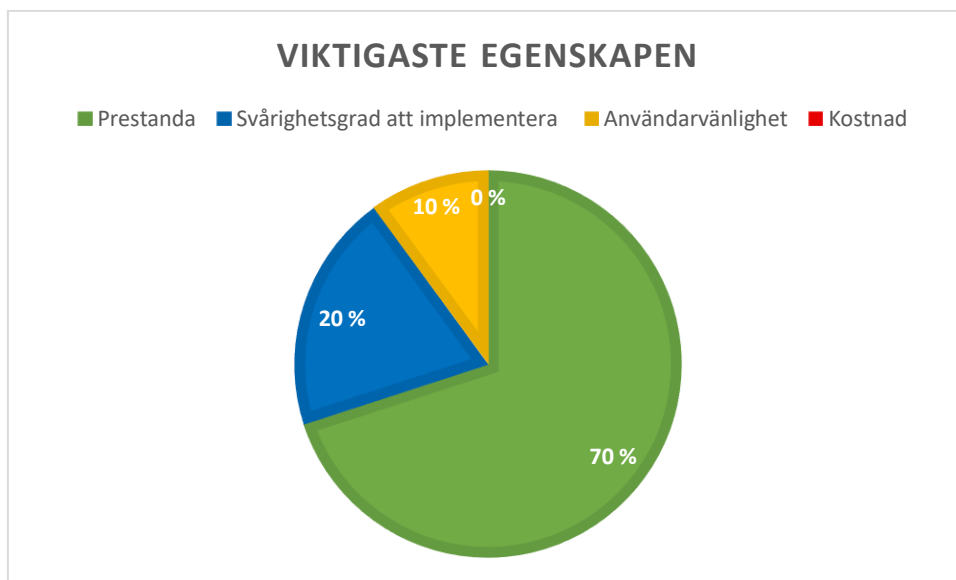
#### Wastegate-ventil på insugssidan

Wastegate-ventil på insugssida. Används på dragracingbilar med små kapacitetmotorer och höga insugstryck. På grund av slirkoppling/centrifugalkoppling. Kan användas vid starten för att kontrollera och stabilisera ökningen av insugstryck.

## Resultat

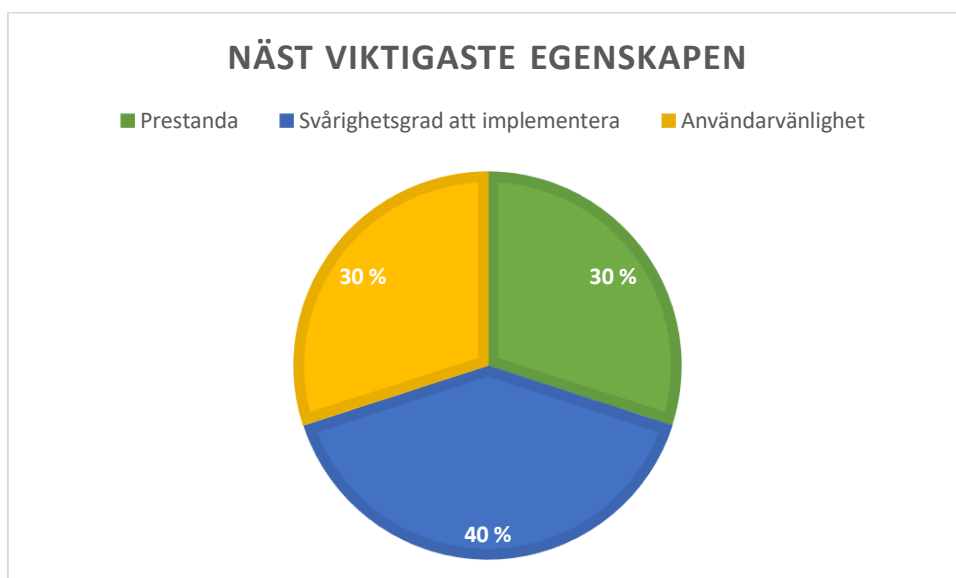
### Enkät

Resultaten från enkäten som skickades ut till tävlande i klassen SSB presenteras i figur 11, 12, 13 och 14. Enkäten skickades ut till 15 aktiva inom sporten. 10/15 svarade på enkäten.



Figur 11: Cirkeldiagram för frågan vilken av de fyra egenskaperna är den viktigaste egenskapen?

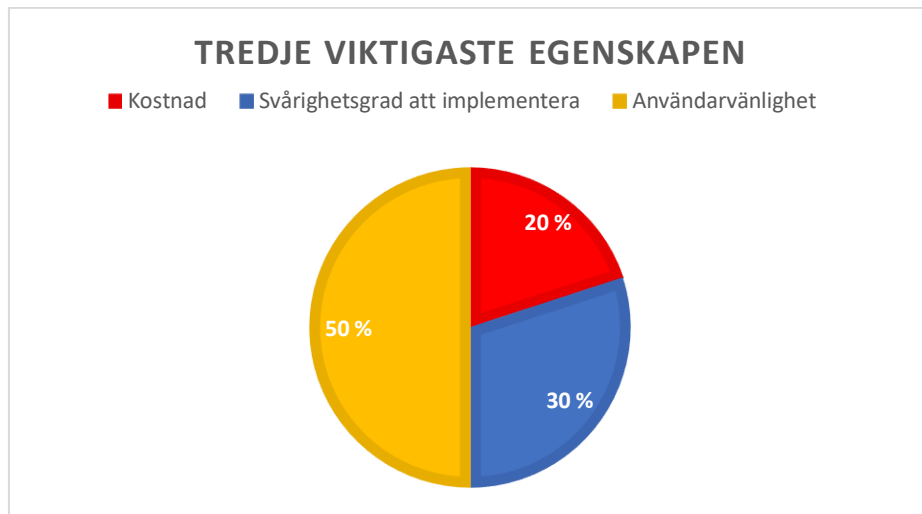
Figur 11 visar att 70% av de tävlande som svarat på enkäten anser att hög prestanda är den viktigaste egenskapen för insugstrycksregleringsstyrenheten. 20 % anser att en låg svårighetsgrad för att implementera styrenheten är den viktigaste egenskapen och 10 % anser att den viktigaste egenskapen för styrenheten är att den ska vara användarvänlig vid användning av styrenheten.



Figur 12: Cirkeldiagram för frågan vilken av de fyra egenskaperna är den näst viktigaste egenskapen?

Cirkeldiagrammet i figur 12 visar att 40 % av de som svarade på enkäten anser att svårighetsgrad att implementera styrenheten är den näst viktigaste egenskapen. 30 % anser att

prestandan är den näst viktigaste egenskapen och de resterande 30 % anser att användarvänligheten är den näst viktigaste egenskapen.



Figur 13: Cirkeldiagram för frågan vilken av de fyra egenskaperna är den tredje viktigaste egenskapen?

I figur 13 visas vilken egenskap som rankas som den tredje viktigaste egenskapen av de som svarat på enkäten. 50 % anser att användarvänlighet är den tredje viktigaste egenskapen. 30 % svarade att svårighetsgrad att implementera styrenheten är den tredje viktigaste egenskapen och 20 % anser att kostnad är den tredje viktigaste egenskapen.



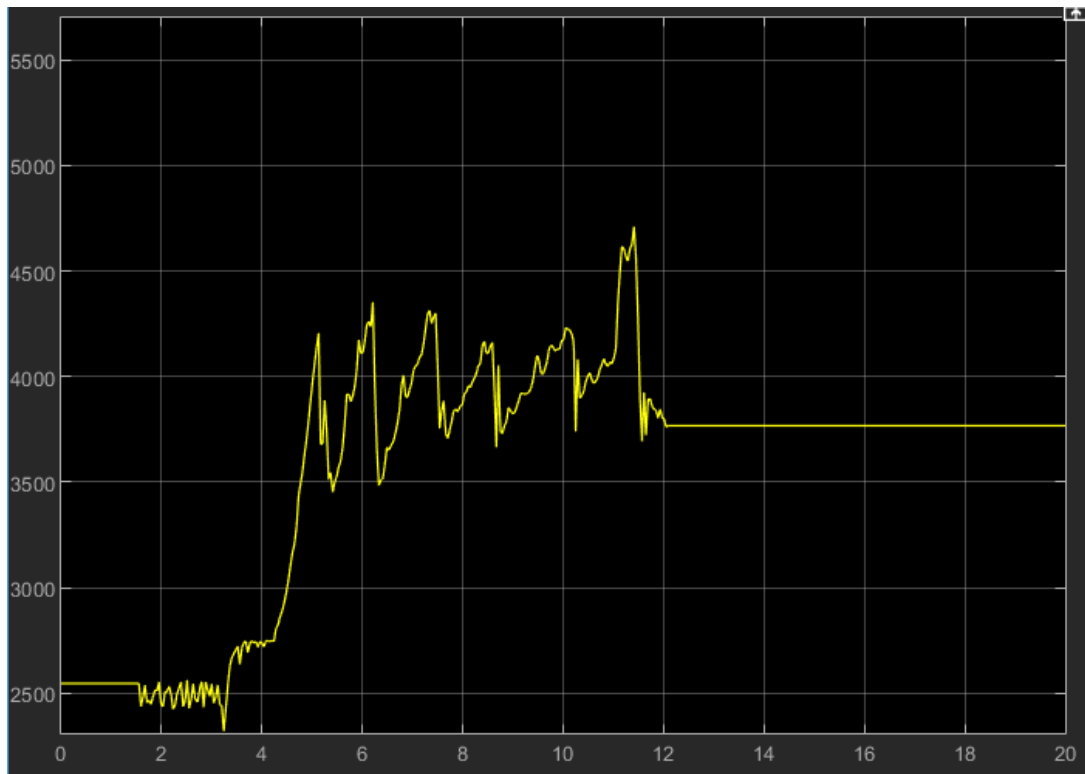
Figur 14: Cirkeldiagram för frågan vilken av de fyra egenskaperna är den minst viktiga egenskapen?

I cirkeldiagrammet i figur 14 visas vilken av egenskaperna som rankades lägst av de individer som svarade på enkäten. 80% rankade kostnad som den minst viktiga egenskapen. 10% rankade svårighetsgrad att implementera styrenheten som den minst viktiga egenskapen och 10 % svarade att användarvänlighet är den minst viktiga egenskapen.

### Simuleringar

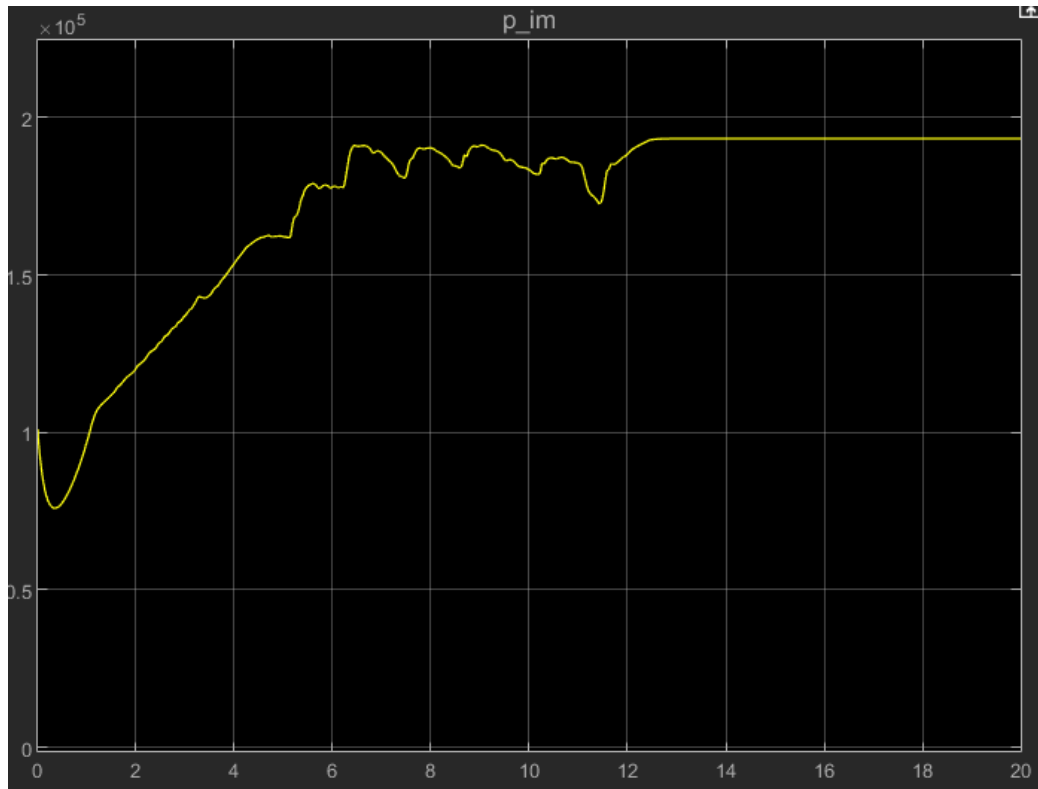
Resultaten från simuleringarna som utförts i Simulink presenteras i figur 15,16,17,18,19,20. X-axeln i samtliga figurer i simuleringsavsnittet är tid i sekunder. Ögonblicket då kopplingen

släpps sker vid cirka 3.2 sekunder. Problemet med överskjutning av insugstryck i startögonblicket går med hjälp av figurerna från simuleringen och litteraturstudien som utförts att spåra till en ökning i turbons varvtal.



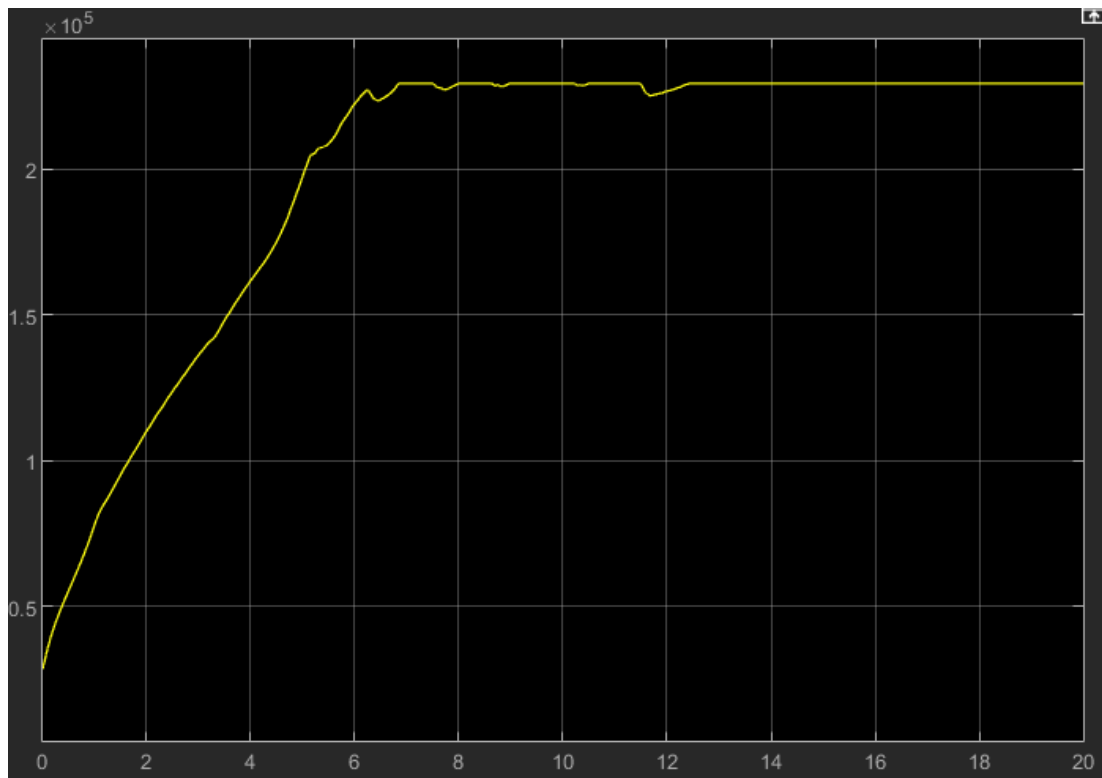
Figur 15: Omskalad Rpm-graf från en av Dag Wagenius körningar

I figur 15 visas resultatet av omskalningen av motorns varvtal som krävdes för att passa motormodellen i Simulink. Y-axeln visar motorns varvtal i [Rpm] och x-axeln tid i sekunder [s].



Figur 16: Insugstrycksgraf med helt stängd wastegate-ventil

I figur 16 illustreras på y-axeln Insugstrycket i [Pa] med en helt stängd wastegate-ventil. X-axeln i figur 16 visar tiden i sekunder [s].



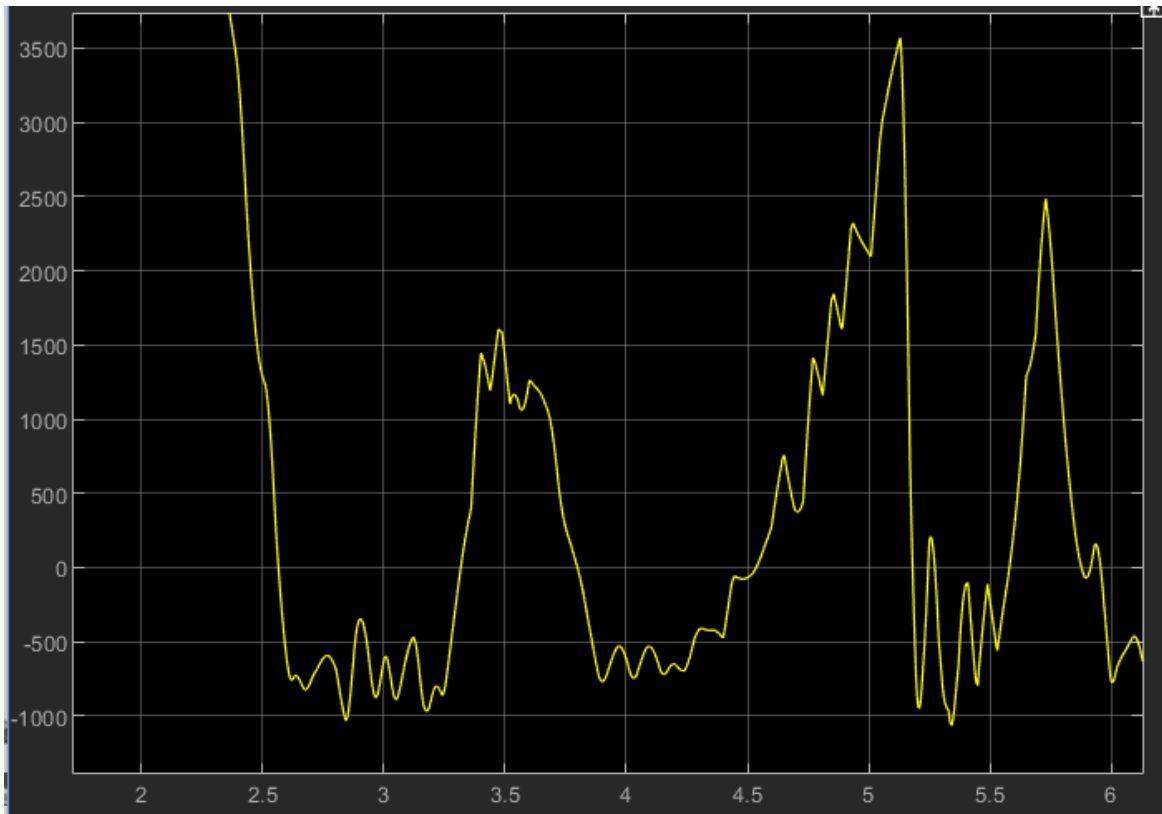
Figur 17: Turbohastighet i Rpm med en helt stängd wastegate-ventil

I figur 17 syns turbohastighetens kurva med helt stängd wastegate-ventil. Enheten på turbohastigheten som visas på y-axeln är [Rpm].



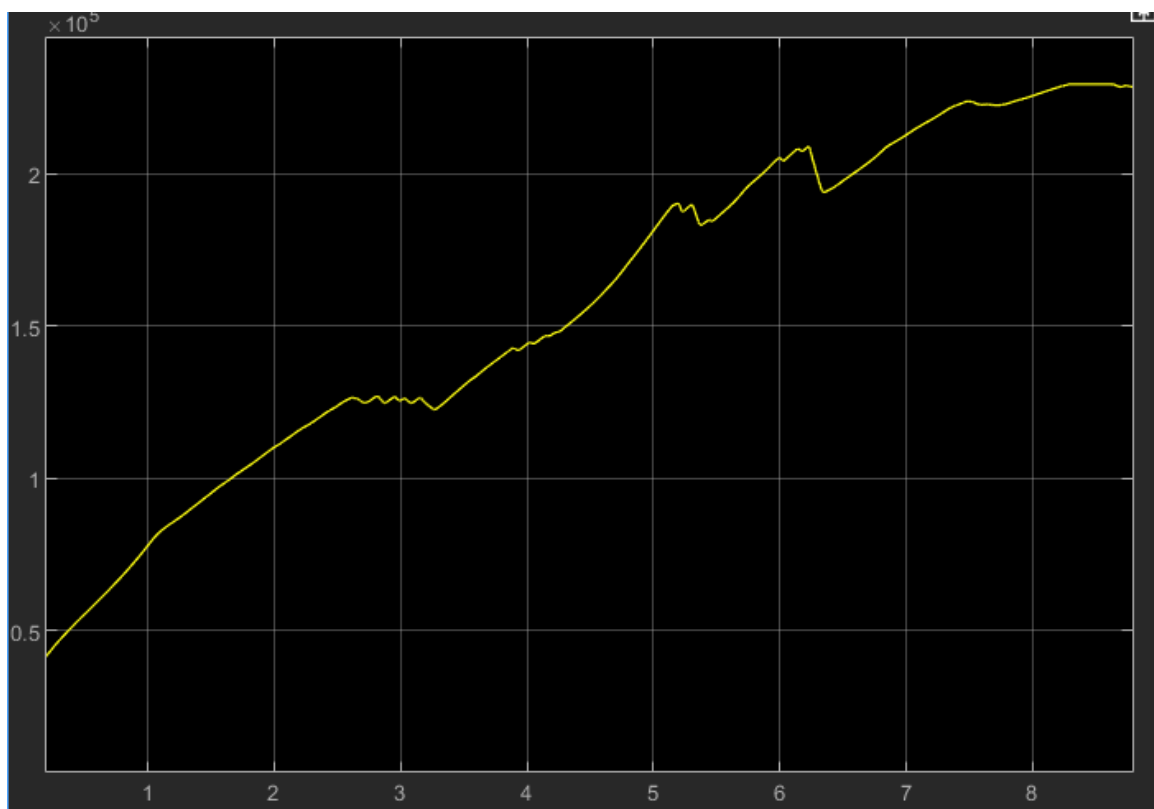
Figur 18: Insugstrycksgraf med PI-styrenhet

I figur 18 visas önskat insugstryck i blått, insugstryck i gult. Enheten på y-axeln är [Pa], och på x-axeln tid i [s]. PI-regulator har värdena  $P=310$  och  $I=3$ .



Figur 19: Reglerfelet (insugstryck) för simulering med PI-styrenhet

I figur 19 syns reglerfelet i gult. Y-axeln är i enheten [Pa] och x-axeln är i sekunder [s]. PI-regulatorinställningar är samma som i figur 16,  $P=310$  och  $I=3$ .

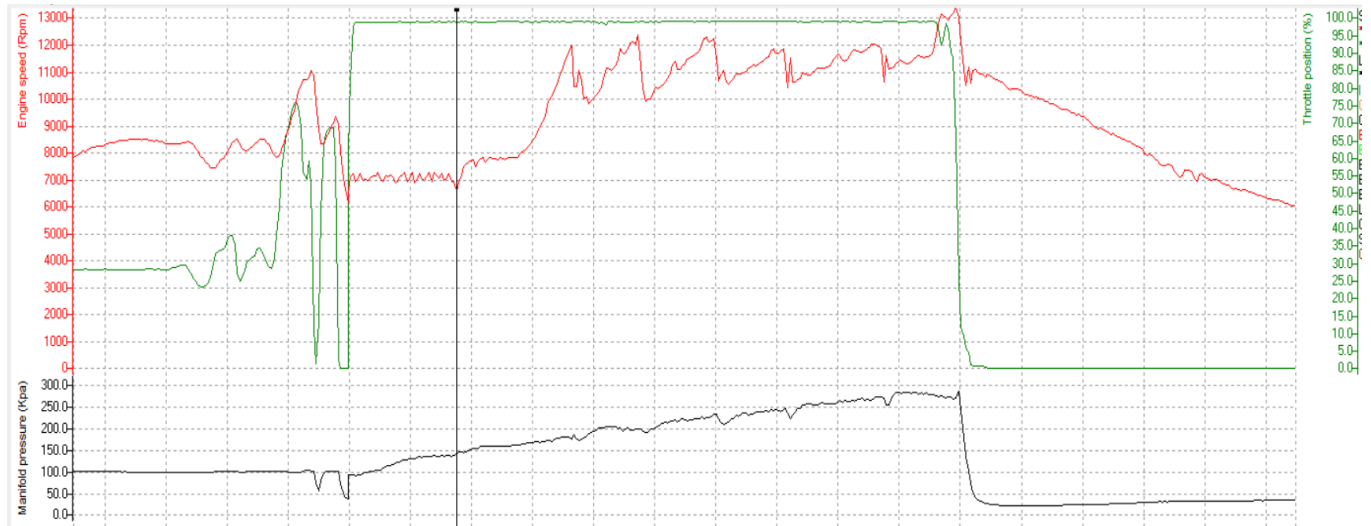


Figur 20: Turbohastighetsgraf från körning med PI-regulator

Figur 20 illustrerar turbohastighet på y-axeln i [Rpm] och x-axeln i sekunder [s]. PI-regulator har samma inställningar som figur 16 och 1,  $P=310$  och  $I=3$ .

### Data från test

I figur 21 presenteras data från en körning med koncept B (två pneumatiska solenoider med endast mottrycket i wastegatehatten som återkoppling).



Figur 21: Data från en körning med Dag Wagenius SSB där koncept B (Pneumatisk wastegate-ventil med två solenoider med endast mottryck i wastegatehatten som återkoppling)

### Beslutsmatris

I figur 22 presenteras beslutsmatrisen där koncepten tilldelats poäng.

	Viktning	Referens	Koncept A	Koncept B	Koncept C
Prestanda	1	0	2	2	2
Kostnad	0,25	0	-1	0	-1
Implementering	0,75	0	1	-1	-1
Användning	0,5	0	0	1	2
Antal +		0	3	3	4
Antal -		0	1	1	2
Summa		0	2	2	2
Viktad summa		0	2,5	1,75	1,5

Figur 22: Beslutsmatris med viktning och poängutdelning genomförd

Konceptet med högst viktad summa är koncept A med den viktade summan 2.5. Konceptet med näst högst viktad summa är koncept B med summan 1.75. Tredje högst viktad summa tillhör koncept C med den viktade summan 1.5. Konceptet med lägst viktad summa är referenskonceptet med summan 0.



## Diskussion

### Simuleringar motormodell Simulink:

Den första simuleringen som utfördes med helt stängd wastegate-ventil (figur 15,16,17) visar hur insugstrycket skjuter i höjden när motorvarvtal och turbovarvtal ökar. Sambandet mellan insugstryck och turbovarvtal som förklarades i teoridelen av rapporten går att se i figurerna 15,16 och 17. I figur 3 som innehåller en kompressormapp syns det att för ett givet massflöde ökar trycket kompressorn kan leverera med högre turbovarvtal.

För att minska ökningen av turbons varvtal i simuleringarna användes en PI-styrenhet. Resultaten från simuleringarna med PI-styrenheten (figur 18,19 och 20) visar att överskjutningen går att eliminera när ökningen av turbons varvtal inte sker lika hastigt som i fallet där wastegate-ventilen var helt stängd. I figur 19 syns att ett litet reglerfel existerar under hela simuleringen. Insugstrycket är innan punkten där kopplingen släpps vid ca 3,5 sekunder högre än önskat insugstryck för att sedan vid startögonblicket gå under önskat insugstryck. Differensen mellan insugstryck och önskat insugstryck är liten i sammanhanget. Under simuleringens gång är reglerfelet för insugstrycket som mest 3500 Pa. Vid verkliga körningar med en solenoid-konceptet har reglerfelet uppgått till 35 000 Pa. PI-styrenheten presterar bättre än en solenoid-konceptet. PI-styrenheten har dock en enklare uppgift vid reglering, då PI-styrenhetens signal går direkt till wastegatepositionen utan att ta hänsyn till wastegate-ventilens öppnings och stängningsdynamik.

En möjlig framtida utveckling för simuleringsmiljön som användes i rapporten är att modellera en wastegate-ventil och därmed ta hänsyn till ventilens öppnings och stängningsdynamik.

### Data från test

Data från testet som utfördes med två solenoidskonceptet (koncept A) syns i figur 21. I figur 21 går det att se att föraren håller gasspjället 100 % öppet under hela körningen. Att föraren kan hålla full gas beror på att insugstrycksregleringen med två solenoider istället för en solenoid på ett bättre sätt reglerar insugstrycket i startögonblicket. Den stora överskjutningen som uppstår med en solenoidskonceptet är förminskat till nivåer som inte längre provocerar fram situationer där föraren behöver reglera momentet till bakhjulet med gashanden.

### Enkät

Antalet svar från de aktiva inom sporten var 10 av 15 utskickade enkäter. Med tanke på hur få det är som tävlar med Super Street Bike i Europa kan 10 svar anses vara en godkänd mängd svar. För att förbättra antalet svar från aktiva hade även tävlande från USA kunnat inkluderas.

### Beslutsmatris

Konceptet med högst viktad summa är koncept A (två pneumatiska solenoider med endast mottrycket i wastegaten som återkoppling). Koncept A tilldelades +2 jämfört med referenskonceptet i egenskapen prestanda. Poängtilldelningen +2 i prestanda motiveras med stöd av data från tester med koncept A. Koncept A lyckades i testerna med uppgiften att

reglera insugstrycket tillräckligt bra för att föraren skall kunna hålla gasspjället 100% öppet under hela körningen. Inom egenskapen kostnad tilldelades koncept A poängen -1 jämfört med referenskonceptet. Koncept A är marginellt dyrare än referenskonceptet då koncept A kräver att en extra solenoid och trycksensor som inte behövs vid användandet av referenskonceptet införskaffas. Implementeringen av koncept A är enkel, endast 6 körningar behövde köras innan konceptet fungerade som önskat. Referenskonceptet har körts ca 10 gånger mer och fungerar fortfarande inte som önskat. Användarvänligheten för koncept A är på en liknande nivå som referenskonceptet.

Näst högst viktad summa i beslutsmatrisen fick koncept B (Elektrisk wastegate-ventil med insugstryck och wastegate-ventilens position som återkoppling). Koncept B testades inte på motorcykeln, däremot utfördes simuleringar och en litteraturstudie för att förstå konceptets potential inom egenskaperna i beslutsmatrisen. Prestandapotentialet för koncept B bedömdes som mycket högre (+2) än referenskonceptets prestanda. Bedömningen utfördes med stöd av de tidigare i rapporten presenterade simuleringarna och litteraturstudien. Kostnaden för koncept B är på liknande nivå som referenskonceptet. Implementeringen av koncept B är marginellt svårare än referenskonceptet. Att implementeringen är svårare beror på att konceptet med elektrisk wastegate-ventil inte ännu är ett etablerat koncept bland dragracingmotorcyklar och därför skulle en helt egen lösning behöva utvecklas. Potentialen för användarvänlighet är lite högre än referenskonceptets på grund av att problem som luftläckor och att fylla på med komprimerad luft i den externa lufttanken försvinner när en elektrisk wastegate-ventil används.

Konceptet med lägst viktad summa är koncept C (Elektrisk wastegate-ventil med insugstryck, ventilens position och turbobastighet som återkoppling). Konceptet har inte under examensarbetets gång testats eller simulerats. Bedömningen av konceptets potential inom egenskaperna som används i beslutsmatrisen baseras helt på hur liknande styrenheter presterat i akademiska artiklar. Prestandapotentialet hos koncept C bedöms med stöd av resultatet från (Holmbom, Liang & Eriksson. (2017b)) och (De Cesare et al. 2017) vara betydligt högre än referenskonceptets prestanda. Kostnaden för koncept C blir högre än referenskonceptets kostnad på grund av att en turbobastighetssensor behöver köpas in som inte hade behövts vid användning av referenskonceptet. Implementeringen av koncept C är mer utmanande jämfört med referenskonceptets implementering. Det som gör implementeringen av koncept C svårare än referenskonceptets implementering är detsamma som i fallet med koncept B. Elektrisk wastegate-ventil och turbobastighetssensorer har inte använts på dragracingmotorcyklar och därför krävs ett egenutvecklat system istället för ett färdigutvecklat system. När implementerings och utvecklingsfasen är avklarade skulle koncept C dock erbjuda hög användarvänlighet då pneumatik försvinner som följd av användandet av elektrisk wastegate-ventil. Datan från turbobastighetssensorn kan också hjälpa inom egenskapen användning genom att ge användaren information om hur dennes turbo opererar som användaren sedan kan använda för att t.ex. skydda turbon från övervarvning

Trots att koncept C har den lägsta summan av de nya koncepten är konceptets viktade summa högre än referenskonceptets. Alla tre koncept som utvärderades i beslutsmatrisen hade högre viktade summor än referenskonceptet. Det vinnande konceptet och det mest beprövade av de tre nya koncepten, koncept A fick högst viktad summa tack vare höga poäng inom prestanda och implementering. De två nya koncepten, koncept B och koncept C fick också höga poäng inom prestanda men drogs ned av låga poäng inom implementering. Om en ordentlig

utvecklingsfas skulle utföras med något av koncept B eller koncept C skulle koncepten i framtiden kunna utmana koncept A om att bli det rekommenderade konceptet för insugstrycksreglering av dragracingmotorcyklar.

### Framtida arbete

Den största svårigheten och svagheten med metoden som använts i rapporten är att alla koncept inte kan testas på samma sätt. De koncept som redan används i dragracingmotorcyklar visar vid test sina egenskaper och vilken potential konceptet har. Potentialen för koncepten som ännu inte används inom dragracing är svårare att bestämma. De nya konceptens potential bestäms istället främst med hjälp av resultat från vetenskapliga studier och hur koncepten använts i andra sammanhang.

För att förbättra metoden och få en rättvisare bedömning för de olika koncepten bör alla koncepten kunna testas på liknande sätt. Naturligt framtida arbete skulle därför vara att utveckla koncept B och koncept C till den nivå att de kan testas på en dragracingmotorcykel som både referenskonceptet och koncept A har testats.

### Slutsats

Syftet med arbetet var att undersöka vilken typ av insugstrycksreglering som är mest lämpad för turbomotoriserade dragracingmotorcyklar. Frågeställningarna för arbetet var ”Vad är det som orsakar den aggressiva ökningen i insugstryck vid startögonblicket?” och ”Vilken insugstrycksregleringsmetod är mest lämpad för dragracingmotorcyklar?” Syftet med arbetet har uppnåtts då tester, simuleringar och en litteraturstudie med fokus på insugstrycksregleringsmetoder för turbomotoriserade dragracingmotorcyklar har utförts med en viktad beslutsmatrix som resultat.

Resultatet visade att en insugstrycksregleringsmetod som använder wastegatehattens tryck som återkoppling var den regleringsmetod som för tillfället är mest lämpad för dragracingmotorcyklar med turbomotor. Den mest lämpade regleringsmetoden har hårdvara som består av en pneumatisk wastegate-ventil och två solenoider för att öka och minska mottrycket i wastegatehatten.

Frågeställningen vad det är som orsakar den aggressiva ökningen av insugstryck vid start från stillastående besvarades med hjälp av simuleringarna och litteraturstudien som utfördes. Simuleringarna visade att det finns ett samband mellan det hastigt ökande motorvarvtalet, turbons varvtal och insugstrycket. Genom att minska flödet av avgaser till turbons turbinsida kan turbohastigheten hållas nere och därmed även insugstrycket.

## Referenslista:

Matteo De Cesare, Federico Covassin, Enrico Brugnoli, & Luigi Paiano. (2017) Boost Pressure Control in Transient Engine Load with Turbocharger Speed Sensing

Lars Eriksson & Lars Nielsen. (2014) Modeling and control of engines and drivelines

Patrick Gorzelic, Erik Hellström, Anna Stefanopoulou, Li Jiang & Srinath Gopinath. (2012) A Coordinated Approach for Throttle and Wastegate Control in Turbocharged Spark Ignition Engines

Hermann Hiereth & Peter Prenninger. (2007) Charging the internal Combustion Engine

Robin Holmbom, Bohang Liang & Lars Eriksson. (2017b) Implications of using turbocharger speed sensor for boost pressure control

Robin Holmbom, Bohang Liang & Lars Eriksson. (2017a) Investigation of Performance Differences and Control Synthesis for Servo-Controlled and Vacuum-Actuated Wastegates