

AVATAR

Advanced Automotive Aircharge Integration

Publik rapport



Författare: Marcus Rubensson, Volvo Cars

Datum: 2019-03-13

Projekt inom Komplex Reglering



Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English.....	4
3 Bakgrund.....	6
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	7
4.1 Forskningsfrågeställningar	8
4.2 Metod	8
5 Mål	8
6 Resultat och måluppfyllelse	9
6.1 Olinjära effekter i återkopplade "air-charge" system	10
6.2 Testrigg för motorprov vid Linköpings Universitet.....	10
6.3 Konzeptutveckling för nya drivlineplattformar vid Volvo Cars.....	10
6.4 "Work Package" sammanfattning.....	10
6.5 Övergripande mål.....	11
7 Spridning och publicering	11
7.1 Kunskaps- och resultatspridning	11
7.2 Publikationer.....	12
8 Slutsatser och fortsatt forskning	12
8.1 Framtida forskningsområden	13
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	13

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

Volvo Car Corporation (VCC) och Linköpings Universitet (LiU) har tillsammans, under perioden 2016 – 2018, genomfört FFI projektet "AVATAR" (Advanced Automotive Air-charge integration) inom programområdet Komplexa System. Ett samarbete har etablerats mellan LiU och VCC, med gemensamma studentprojekt, M.Sc examensprojekt, doktorandarbete och forskningsprojekt.

Framtida förbränningsmotorkoncept innehåller allt mer komplexa luft- och turbo-system (eng: "air-charge systems") för att möta allt hårdare prestanda, emissions- och förbruknings-krav. De integreras allt oftare i elektrifierade drivlinor med många alternativa konfigurationer. Detta ställer nya och högre krav på de algoritmer som styr och reglerar air-charge systemen.

Inom AVATAR projektet har modellbaserad design-metodik för avancerade fordon-styrssystem utvecklats. Studier har gjorts av några framtida air-charge koncept, främst av lågtrycks EGR-system för bensinmotorer och elektriskt driven kompressor för överladdning. Nya avancerade modeller har tagits fram för förbättrad luft- och turbo-reglering.

Projektbidragen från Vinnova har finansierat det arbete som utförts vid LiU. Det har använts för en doktorandtjänst med handledning, samt för driftskostnader och support av motor-labb vid "Avdelningen för Fordonsystem". VCC har lagt sin egenfinansierade resurs på hårdvaru- och styrsystems-support, handledning, implementering av styrsystemsmjukvara, test och verifiering i motor-rigg samt för projektstyrning.

Projektpart vid Linköpings Universitet har varit "Avdelningen för Fordonsystem" vid Institutionen för Systemteknik. Avdelningens undervisning och forskning sammanfaller väl med de industriprojekt som bedrivs vid sektionen för motorreglering (97540) hos VCC. AVATAR projektet har skapat många kontakter mellan seniora systemutvecklare vid VCC och forskare och studenter vid LiU. Samarbetet har resulterat i ett antal nyrekryteringar till VCC, utöver de tekniska rapporter och resultat som kommit båda parter till nytta.

Inom AVATAR projektet har tre tekniska artiklar publicerats. Dessa kommer att ligga till grund för en kommande Licentiatavhandling. Sex stycken M.Sc. projektarbeten har utförts i samarbete med VCC. Simuleringsmodeller för test och verifiering har uppdaterats för konceptstudier, och styrsystemsmjukvara för air-charge prototyp-hårdvara har utvecklats vid både VCC och LiU.

Både VCC och LiU bedömer AVATAR projektet som mycket lyckat. Förhoppningen är att samarbetet ska kunna fortsätta inom nya gemensamma FFI-projekt.

2 Executive summary in English

Volvo Car Corporation (VCC) and Linköping University (LiU) have completed a joint FFI-project, called "AVATAR" (Advanced Automotive Aircharge integration), during the period of years 2016-2018. The project has performed research at LiU, hosted M.Sc. thesis projects and supported engine test facilities.

The Vinnova funding has financed the work performed at LiU, in particular a Ph.D. research position. The project has also supported the engine test-facilities at the department of Vehicular Systems at LiU, both with hardware and software development and with engineering support. VCC has spent own resources on support, supervision, prototype hardware development, concept tests and evaluations and implementation of control algorithms in engine control software.

The combustion engine has had a remarkable evolution during recent years. New requirements on fuel economy, performance and emissions have resulted in smaller engine designs relying on powerful air charging capacity to fulfil design objectives (referred to as engine "down-sizing"). The future concepts for air-charge systems is therefore anticipated to grow increasingly complex. They will incorporate novel strategies and system designs, to meet the new requirements. The combustion engine will more often be integrated with electrical propulsion systems in a wide range of hybrid applications. The demand for improved control strategies for the air-charge components will also increase. Some specific challenges are: an increased amount of engine variants and configurations, raised requirement levels which requires improved performance and system coordination, new drivelines with mixed propulsion concepts and tighter control targets for improved fuel economy, emissions and overall performance.

The AVATAR project proposes a model-based design approach to address the challenges with integration and design of the new complex drivelines. This applies to both vehicle control systems design, implementation and verification. AVATAR specifically considers the air-charge systems in the combustion engine. The project has targeted a selection of key sub-systems, considered highly relevant for future production projects. Studies have been performed on the low-pressure EGR concept, multi-stage turbo charging configurations, electrically driven compressor and also investigated general actuator control with non-linear system dynamics.

The air-charge system contains the engine parts and components that provide air to the combustion. This includes turbo chargers, with compressors and turbines, EGR circuits for NOx emission control and the various valves and throttles used to control the air-flow. The real-time control of the air-charge actuators utilizes feedback information from sensors (for pressures, temperatures and flows in the air-path) together with model information, in an implementation of control algorithms in the engine control system. The air-charge control software serves two purposes: feedback control to desired operating conditions and state estimations for system-wide use in engine controls.

The AVATAR research has resulted in three technical articles, published as conference papers, and will form the base for an upcoming Licentiate thesis as a part of the Ph.D. research work. There has also been six M. Sc. thesis projects completed within the AVATAR project, jointly supervised by LiU and VCC. These thesis projects have worked with model-based design and control using the LiU engine test-bed for data collection, tests and verification.

Relevant research topics that have been addressed in the AVATAR project. Model-based control for non-linear systems has been used for actuator control in systems with mechanical, thermal and dynamic nonlinearities. These are effects often present in air-charge actuators and there is great potential with physically model-based approaches compared to traditional strategies. Detailed system models have been integrated in a complete-engine simulation environment for concept development and testing. This virtual development has shown to provide an adequate base-line for real engine tests and control algorithms, which can then be further refined to the actual application. The air-charge system has several interacting sub-

systems. There are opportunities to investigate various multi-variable control concepts for improved performance and robustness. This is also a very relevant research area.

The model-based method for control system development has followed a sequence of activities. Starting with concept studies using physical models and simulations, the next step is to collect real engine data from the test-bed. Using data, the models can be verified and parameterized, and used in model-based design methods. The control concepts are developed in the simulation environment and then implemented in the control system of the test-engine. After tests and verification, the strategy can be easily transferred and implemented in the engine control software of an actual production project.

AVATAR presents results for a selection of promising hardware concepts, where prototype hardware has been developed and model-based control system design have been used for control system implementations in real-time test-engine control software. The systems that have been tested are: two-stage turbo charger for gasoline engine (prepared with measurement inserts), electric wastegate for turbine flow control, reference throttle for detailed flow modelling, low-pressure EGR prototype system and sensor prepared exhaust manifold system including turbine housing. Dynamic models have been developed for the systems and concept control strategies developed in a virtual simulation environment. Tests and validations have then been performed on an actual test-engine. In addition VCC has made developments aided by the knowledge gained from the AVATAR project. Strategies have been integrated in the software platform for upcoming production projects. Key implementations are made for model-based turbo control, model-based air-charge control, electric compressor, electric waste-gate and low-pressure EGR system.

Proposed future research topics related to the scope of AVATAR could be regarding self-learning and autonomous control concepts, related to e.g. Model Predictive Control (MPC), machine learning, adaptive control and robust optimal multi-variable control theory. Another area more related to driveline configurations could be the investigations of torque management in hybrid vehicles, such as coordination strategies and securing high-level system requirements.

Volvo Cars and the University of Linköping are very satisfied with the achieved collaboration within the AVATAR project. It has proven fruitful with much knowledge sharing in relevant research areas.

3 Bakgrund

Förbränningsmotorn har under de senaste åren genomgått en omfattande utveckling när det gäller bränsleförbrukning, prestanda och emissioner. Med sitt nya motorprogram, VEA ("Volvo Engine Architecture"), tog Volvo Cars ett stort steg framåt och ligger nu i framkant när det gäller CO₂ och prestandauttag för nerskalade förbränningsmotorer. Motorprogrammet utgår från en gemensam basmotor där olika effektnivåer realiserar med hjälp av olika uppladdningssystem (turbo), eng. "air-charge".

Framtida koncept kommer att innehålla allt mer elektrifierade drivlinor. Men förbränningsmotorn är fortfarande en kostnadseffektiv energikälla som ger fordon en längre räckvidd än vad bara elektrisk framdrivning kan göra. Därför kombineras förbränningsmotorn nu ofta med elektrisk framdrivning i olika hybrida drivlinekoncept. De hybrida drivlinorna driver utvecklingen mot mindre och effektivare förbränningsmotorer. Med en mindre motor kan man åstadkomma högre effekt med ett kraftfullare uppladdningssystem, eng. "downsizing". Förbränningsmotorn kan också göras både effektivare och miljövänligare genom användande av biobränslen, hybridiseringsstrategier och KERS ("Kinetic Energy Recovery Systems").

De olika drivline-konfigurationerna och ständigt uppdaterade effekt och emissionskrav, gör att utvecklingsprojekten måste hantera många olika, och allt mer komplexa, varianter av uppladdningssystem ("air-charge"). Detta kräver en effektiv, robust och kostnadseffektiv integrering av de olika "air-charge" delsystemen, både när det gäller hårdvara och styrsystemsmjukvara.

Exempel på några "air-charge" koncept som förväntas introduceras i framtida motorprojekt är:

- EGR ("Exhaust Gas Recirculation") har sedan länge varit ett standardsystem på dieselmotorer för att förbättra emissionerna från förbränningen. EGR används primärt för att ge en lägre förbränningstemperatur och reducerar därmed bildandet av kväveoxider. Nya koncept finns där man vill införa EGR även för bensinmotorer. För dieselmotorer tittar man på uppdaterade system med flera återcirkuleringskretsar för att optimera användandet för olika driftfall. "Lågtrycks-EGR" är ett lovande koncept som går att använda för både diesel och bensinmotorer. De nya systemen blir ofta mer komplicerade, vilket kräver nya system-modeller för att kunna förstå den underliggande fysiken. Det behövs även nya styrsystemsalgoritmer för reglering för att utnyttja den nya hårdvaran optimalt.
- Flerstegs turbouppladdning med nya alternativa turbin-geometrier, kompressordrivning och mer avancerade aktuatorer. De nya turbosystemen utvecklas för att få effektivare motorer med tillräckligt hög prestanda. Återigen ställs nya krav på systemmodellering och reglering. Kraftfullare elsystem i de nya drivlinorna möjliggör nya elektrifierade koncept, såsom elektriskt driven kompressor-uppladdning.

"Air-charge" systemet består av de motordelar och komponenter som levererar luft till förbränningen. Det innefattar turbo-system med kompressorer och turbiner, mekaniska och elektriska kompressorer, EGR kretsar, trottell och tillhörande aktuatorer och sensorer. Styrsystemet för "air-charge" systemet är en del av motorstyrsystemet, med realtidsmjukvara implementerad i ECU ("Engine Control Unit"). "Air-charge" mjukvaran har två primära uppgifter:

1. Återkopplad reglering av "air-charge" luft-systemet till önskad arbetspunkt
2. Estimering av systemtillstånd som används både för regleringen och för kommunikation med andra styrsystemsdelar, t.ex. momentestimering, bränsle-system, emissions-system, motorskydd och diagnostik.

Den mer fysikaliska aspekten är att "air-charge" systemet reglerar luft-densitet och gas-sammansättning till förbränningen, vilket påverkar både momentrespons och emissioner. Exakt och robust reglering är kritiskt för en bra motorprestanda. Komplexiteten hos "air-charge" systemen förväntas att öka i framtiden. Några av orsakerna till detta är:

1. Ett ökat antal "air-charge" varianter och konfigurationer för ett givet motorprojekt ger en rent numerär ökad komplexitet, där man måste hantera olika hårdvaror och systemlösningar.
2. Hårdare system-krav kräver en bättre samoptimering av olika delsystem, med en väldefinierad och noggrann kommunikation. Detta ställer högre krav på både reglering och estimering.
3. Nya drivlinekoncept med alternativa framdrivningssätt och elektrifiering introducerar nya styrstrategier för momentbegäran och användandet av de olika delkomponenterna.
4. Hårdare emissionskrav med lägre CO2 nivåer gör att delsystemen måste optimeras ytterligare med driftspunkter allt närmare motorns begränsningar. Det ger ett behov av mer exakt och robust reglering och estimering av "air-charge" systemet.

Regleringen av framtidens "air-charge" system kommer att bli allt mer komplex. Samtidigt påverkar dess regler-prestanda kritiska egenskaper hos förbränningsmotorn, såsom momentgenerering och emissioner.

I produktionsprojekt är det viktigt att kunna balansera krav mellan olika delsystem. Detta stämmer även för de olika delsystemen i en drivlina. Då krävs någon typ av abstraktion för att beskriva delsystemets karakteristik och beteende. En sådan beskrivning kan, om den är felaktig, resultera i en skev kravbalansering. Om man till exempel vill sätta momentkraven på en förbränningsmotor i en hybrid drivlina för att uppnå en viss respons, så räcker det inte med stationära prestanda krav på momentgenereringen. Man måste också ha en beskrivning på respons av momentet, vilket typiskt bestäms av turbo systemets specifikation. När antalet delsystem ökar och drivlinorna blir mer komplexa blir kravbalansering allt viktigare. Om delsystemen inte är korrekt anpassade till varandra och till de övergripande kraven kan man antingen få en alldeles för dyr systemlösning, eller en lösning där de övergripande kraven inte uppfylls. Komplexiteten hos "air-charge" systemet och dess direkta inverkan på moment och emissioner gör det extra viktigt med en korrekt beskrivning av dess egenskaper. Det måste finnas en robust och predikterbar reglering och en noggrann systembeskrivning för att önskad systemprestanda ska uppnås.

AVATAR projektet har utvecklat förbättrade modeller och metoder för "air-charge" system design och reglering. Koncepten har testats, implementerats och verifierats i motorstyrssystem på testmotorer och testbilar. Det föreslagna tillvägagångssättet innehåller följande huvudpunkter och aktiviteter:

1. Dynamisk beskrivning och modellering av "air-charge" systemets prestanda och respons
2. Framtagande av noggranna olinjära modeller för de olika delsystemen, baserat på faktiska mätningar i testmotor-rigg och i test-bilar.
3. Systembeskrivning och analys, för framtagande av robusta modellbaserade regler-algoritmer.
4. Användande av simuleringsmodeller för virtuell provning och detaljerad analys

När den modellbaserade metodiken är framtagen och verifierad är den ett effektivt verktyg för design av reglerstrategier och systemlösningar för de olika framtida "air-charge" koncepten.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

För att vara konkurrenskraftig inom fordonsindustrin strävar man efter att få kortare produktcykler och ett bredare utbud av varianter, d.v.s. utvecklingstiden behöver bli kortare. Man försöker samtidigt effektivisera användandet av ingenjörresurser, testanläggningar och testobjekt. Olika produktvarianter kräver typiskt en unik styrsystemsimplementering och individuell testning och verifiering. AVATAR projektet var definierat till att hantera några av dessa problemställningar

med ett modulärt angreppssätt. Detaljerade och väldefinierade komponent-modeller kombineras och konfigureras till en komplett "air-charge" modell för virtuell testning och verifiering. De virtuella modellerna testas generellt snabbare än realtid och flera test-fall och konfigurationer kan enkelt utföras med ett automatiserat simuleringsverktyg. Ett väl fungerande modellbibliotek med tillhörande simuleringsmiljö kan användas både under utvecklings- och konceptfas så väl som för verifiering i ett pågående industriprojekt.

4.1 Forskningsfrågeställningar

De viktigaste forskningsfrågorna som har behandlats i AVATAR är:

- Reglering av system med olinjära effekter. Exempelvis: olinjär respons hos aktuatorer, temperatur-beroenden, mekaniska förluster och dynamiska beroenden mellan delsystem. Detta är effekter som ofta inte hanteras av dagens modelleringsansatser för "air-charge" system och det finns stor potential för förbättringar av reglerprestanda utifrån dagens reglersystem.
- Noggranna dynamiska simuleringsmodeller för de olika delkomponenterna i ett komplett "air-charge" system behövs för en korrekt motor-simuleringsmodell. För att få rätt respons i simuleringen krävs fysikaliskt korrekta modeller, identifierade från verklig mätdata från testobjekt. Med en detaljerad motor-simuleringsmodell kan man dra principiellt riktiga slutsatser gällande moment generering, emissioner och CO2 nivåer för en given drivline-konfigurering. Forskningsfrågan är, hur man parametersätter och anpassar del-modeller till verklig data med systemidentifieringsmetoder så att komplett-simuleringen blir så korrekt som möjligt.
- Modellbaserad reglering för fler-variabla "air-charge" system, för att få ökad robusthet. D.v.s. hur man använder modellinformation i styrsystems-algoritmerna för att få en bättre reglering. Av särskilt intresse är hur man kan hantera kopplingseffekter mellan de olika delsystemen.

Forskningsresultat ska publiceras i tekniska artiklar och ligga till grund för en Licentiat-avhandling av den FFI-finansierade doktoranden.

4.2 Metod

Metoder för modell-baserad reglering och design har utvecklats för "air-charge" system. Systemen har testats i virtuella simuleringsmiljöer och i fysiska test-motorer. Strategier för reglering och on-line estimering har implementerats i realtids motorstyrsystem. Projektet har använt sig av följande metod:

- Konceptstudier genom fysikalisk modellering och simulering.
- Datainsamling från motor-rigg (eller testbilar) för systemidentifiering och parametersättning av modeller.
- Modellbaserad reglerdesign utvecklad och testad i simuleringsmiljö.
- Implementering av realtids-algoritmer i "rapid-prototyping" system.
- Test och verifiering i motor-rigg och i testbilar.
- Implementering av algoritmer i motorstyrsystem för produktionsprojekt

5 Mål

Air-charge (eng.) *luft-laddning, system för att tillföra luft till cylindrarna i en förbränningsmotor (turbo, trottel, EGR, kompressor, laddluftkylare, samlingsvolymmer, transportvolymmer etc.)*

Projektmålet för AVATAR har varit att utveckla modeller och metoder för implementering av "air-charge"-system i motorstyrsystem. Detta för att ge förutsättningar för en effektiv design och utveckling av komplexa drivlinor. Modellbaserade metoder ökar kunskapen om de ingående

systemen och är en kostnads-effektiv utvecklingsmetod för att integrera "air-charge"-komponenter i framtidens drivlinor. Metoderna underlättar, och är i många fall nödvändiga, för exv. virtuell testning i automatiserade simuleringsmiljöer.

Samarbetet mellan industri och universitet ger en gemensam kunskapsbank av modeller, metoder, datarepresentation, testfall, arbetssätt m.m. Detta underlättar för framtida samarbeten, utbyte av forskningsresultat och ytterligare kunskapsuppbyggnad. VCC strävar efter att fortsatt vara ett utvecklingsföretag med relevant kunskap "in-house", i de Svenska utvecklingsavdelningarna. Forskningssamarbetet med svenska universitet stärker en sådan position. AVATAR syftar till att bygga upp en djupare kompetens inom "air-charge" system-design, reglering och styrsystems-implementering. Avdelningen för Fordonsystem vid Linköpings universitet bedriver forskning och undervisning inom nyckelområden för sektionen för motor-reglering hos VCC. De har egna test-riggar med provmöjligheter och ett kursutbud som inriktar sig mot just förbränningsmotor-reglering. AVATAR-projektet är därför ett sätt att fördjupa samarbetet med riktad forskning mot svensk fordonsindustri.

AVATAR bedrivs inom programmet "Komplex Reglering". Projektet kommer att beröra flera frågeställningar som relaterar till komplexa drivlinor och egenskaper för kompletta fordon:

- Modellbaserade funktionsmoduler av "air-charge" delsystem ska enkelt kunna integreras i olika konfigurationer, för en generisk uppbyggnad av både styrsystem och virtuella simuleringsmodeller.
- Utvecklade modeller för både hårdvara och styrsystem kommer direkt kunna användas för simulering av både drivlineegenskaper och komplett fordon. Dessa simuleringsmiljöer kan sedan användas för system-design och kravbalansering under konceptutveckling.
- Modellbaserad metodik möjliggör en effektivare kalibrering av styrsystem-parametrar, där det exv. blir lättare att skapa en "base-line" för olika variant-variationer. Effektivare kalibrering och verifiering i produktionsprojekt gör det möjligt att korta utvecklingstiden.

Projektet kommer att implementera algoritmer i realtids-styrsystem för testning och utvärdering på fysiska provobjekt. Målet är att få bättre prestanda och robusthet på regleringen av "air-charge"-systemen, eller belysa kritiska svagheter i system-egenskaper. De nya strategierna kommer jämföras med dagens produktionslösningar. Avsikten är sedan att gå vidare från konceptfas till implementering i framtida produktionsprojekt.

6 Resultat och måluppfyllelse

AVATAR projektet har jobbat med ett antal framtida koncept för "air-charge" systemet i en förbränningsmotor. Prototyp-hårdvara har tagits fram hos VCC för testning på den testmotor som sedan tidigare finns installerad hos Avdelningen för Fordonsystem vid LiU. De system och prototyper som tagits fram och använts för testning är:

- Tvåstegs turbo-aggregat för bensenmotor (anpassad diesel-turbo preparerad med mätpunkter/sensorer)
- Elektrisk wastegate aktuator för turbin-reglering
- Referens-trottel för detaljerad flödesmodellering
- Lågtrycks EGR system (prototyp system från VCC)
- Termo-preparerat turbosystem för avgastemperatur-modellering

Dynamiska modeller för de valda del-system har implementerats i en simuleringsmiljö för komplett motor. Konceptutvecklingen av reglerstrategier kan då göras virtuellt i simuleringsmiljön. Funktionaliteten har sedan implementerats i motorstyrsystem och testats i motor-rigg, Resultaten visar på att det virtuella utvecklings-arbetet ger fungerande algoritmer i det verkliga motorstyrsystemet, men att dessa måste förfinas ytterligare för att uppnå önskade krav i den verkliga applikationen.

6.1 Olinjära effekter i återkopplade "air-charge" system

Olinjära effekter i återkopplade dynamiska system har stor påverkan på reglerprestanda. Ett urval av kritiska delkomponenter i "air-charge" systemet har analyserats djupare. Resultaten finns presenterade i tekniska rapporter. Behandlade delsystem:

- Jämförelse av olika turbin bypass flödes-aktuatorer, olinjära effekter och fördelar med alternativa systemlösningar.
- Olinjära pulsations-effekter för trottlar och ventiler. Kompenseringsalternativ för styrsystemsimplementering.
- Temperatureffekter på avgasturbiner, påverkan på flödesestimering, effektprestanda och reglerstrategier.

Utredningarna har gett ökad förståelse för de dynamiska effekter som uppstår i ett återkopplat "air-charge" system. Erfarenheterna har förts vidare till konceptutvecklingen för de nya drivlinorna som väntas införas på VCC.

6.2 Testrigg för motorprov vid Linköpings Universitet

VCC har lånat ut en komplett bensinmotor till Avdelningen för Fordonsystem vid LiU. Den står installerad i en testrigg. AVATAR-projektet har finansierat underhåll och utveckling av den hårdvara och mjukvara som krävs för att få en fungerande testmiljö. Motorn har utrustats med ett avancerat mätsystem med anpassade mätpunkter för sensorer av temperaturer, tryck och flöden. Testriggen har ett "rapid-prototyping" system för att utveckla och exekvera egna styrsystems algoritmer i realtid. Detta har gett LiU möjlighet att göra egen testning och konceptutveckling, vilket har använts för M.Sc. projektarbeten, doktorandprojektet och för undervisningsändamål. AVATAR har möjliggjort ett effektivt utbyte av tester och resultat. Med utförande av relevant forskning för VCC och fordonsindustrin.

6.3 Konceptutveckling för nya drivlineplattformar vid Volvo Cars

De nya drivline-plattformarna som utvecklas hos VCC innefattar många av de nya "air-charge" koncepten som behandlats inom AVATAR. De har en större grad av elektrifiering vilket påverkar hur de olika delsystemen samverkar. Implementering av algoritmer och funktioner för nya koncept har gjorts i VCC's plattformsmjukvara. Funktioner har utvecklats för modellbaserad turbo-reglering, modellbaserad luftreglering, elektrisk kompressor, elektrisk wastegate och lågtrycks EGR system.

6.4 "Work Package" sammanfattning

Nedan följer en kort sammanfattning av resultaten från definierad "Work Package" (WP) i AVATAR. Det finns även separata rapporter för en del WP, dessa, bifogade till denna slutrapport.

1. **"Air-charge System Integraion in Complex Drivelines"**
Tanken var att här definiera upp riktlinjer för hur "air-charge" systemen ska integreras i de framtida drivlinorna, vilka interface och kravställningar som krävs för att uppnå övergripande systemprestanda. Integreringsarbete har gjorts för nya koncept-drivlinor, men det finns mycket mer kvar att definiera och utreda gällande detta.
2. **"Virtual Platform"**
Miljöer för komplett motor-simulering finns både på VCC och LiU. Dessa har uppdaterats med de nya koncepten som utretts inom AVATAR.
3. **"Engine Control Software Implementation"**
Styrsystem-mjukvara har utvecklats både hos LiU och VCC. På LiU har algoritmer implementerats i ett "rapid-prototyping" realtids-system, med sensor- och aktuator-interface till tesmotor i motorrigg. VCC har använt sin egna plattform för mjukvaruutveckling.

4. **”Dynamic Non-linear Models for Air-charge Systems”**
Ett antal delsystem har analyserats och modeller för dessa har använts för simulering och analys. Verifiering har gjorts utifrån verklig testdata från mätningar i motor-rigg.
5. **”System Analysis for Model-based Control”**
Med en lämpligt vald modell-struktur ges möjlighet att kvantifiera systemegenskaper som påverkar regleringen av delsystemen. Detta ger förutsättningar att välja lämplig strategi för styrsystems-algoritmerna.
6. **”Model-based Robust Air-charge Control”**
De framtagna system-modellerna har använts för att designa modell-baserade regulatorer som implementerats i motorstyrsystem. Med en fysikalisk ansats har lämpliga strategier kunnat väljas för att åstadkomma en robust reglering.
7. **”Prototype Development for Engine Control”**
Ett antal olika prototyp-hårdvaror har byggts hos VCC och använts under AVATAR-projektet, främst vid motor-testriggen hos LiU. System som testats är: lågtrycks EGR-system med tillhörande sensorer och aktuatorer, anpassade turbo-system, elektrisk wastegate turbin-aktuator, referens-trottel för flödesmodellering och temperatur-sensor-preparerade grenrör/turbin-hus.

6.5 Övergripande mål

AVATAR-projektet har etablerat ett givande samarbete och utbyte mellan industri och universitet. Det har möjliggjort att forskning utförs inom prioriterade utvecklingsområden hos fordonsindustrin. Forskningen har bedrivits av en FFI-finansierad doktorand, som i sin tur har stått för handledning av sex stycken M.Sc. examensarbeten. Utöver detta har det även utförts studentprojekt med större grupper av 4:e-års-studenter, varav vissa brukar välja att även göra sitt examensarbete vid Avdelningen för Fordonsystem (dvs. inom ramen för AVATAR).

Tre av de nyutexaminerade studenterna från LiU, som gjort examensarbete inom AVATAR-projektet, har efter studierna valt att fortsätta med en anställning inom fordonsindustrin hos VCC.

Projektet har levererat tekniska rapporter inom ramen för ett doktorandarbete, motsvarande en stor del av kraven inför en Licentiatavhandling.

Forskningsresultat och utvecklingsjobb som gjorts inom AVATAR har även kunnat överföras till konceptutvecklingen hos VCC. Många strategier har implementerats i VCC's plattformsmjukvara för användande i kommande produktionsprojekt.

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatsspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	forskning och projektarbeten har bedrivits och dokumenterats, testning och utvärdering har gjorts på fysiska testobjekt, ett antal tekniska rapporter och artiklar är publicerade
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt		
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	utvalda metoder och modeller har redan implementerats i framtida produktprojekt
Introduceras på marknaden	X	algoritmer är implementerade i plattformsmjukvara för motorstyrsystemet och därmed planerat för marknaden

Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut		
--------------------------------------------------------------------------	--	--

7.2 Publikationer

Tre konferensartiklar har publicerats inom ramen för AVATAR projektet. Dessa kommer att ligga till grund för den Licentiatavhandling som är planerad för FFI-finansierade doktorandtjänsten. Artiklarna finns publicerade under respektive utgivare:

- R. Holmbom, B. Liang och L. Eriksson (2017) "Investigation of Performance Differences and Control Synthesis for Servo-Controlled and Vacuum-Actuated Wastegates", SAE Conference WCX17 (DOI: 10.4271/2017-01-0592)
- R. Holmbom, B. Liang och L. Eriksson (2017) "Implications of Using Turbocharger Speed Sensor for Boost Pressure Control", IFAC Conference WC17 (DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.2484)
- R. Holmbom och L. Eriksson (2018) "Analysis and Development of Compact Models for Mass Flows Through Butterfly Throttle Valves", SAE Conference WCX'18 (DOI: 10.4271/2018-01-0876)

(DOI: Digital Object Identifier)

Det har gjorts sex stycken M. Sc. projekt-/examens-arbeten genom AVATAR projektet. Dessa har utförts vid Linköpings Universitet i samarbete med Volvo Cars.Handledning har delats mellan FFI-doktoranden och seniora systemutvecklare vid Volvo Cars. Examensarbetena har utrett nya modelleringsansatser för valda "air-charge"-system och utvecklat algoritmer/strategier för implementering i motorstyrssystem. Insamling av mätdata, test och verifiering har gjorts på fysisk motor i motor-labb hos LiU eller hos VCC. Projektrapporterna finns bifogade till denna slutrapport:

- B. Liang och R. Holmbom (2016) "Boost control with turbo speed sensor and electric wastegate", Examensjobb vid Avdelningen för Fordonsystem, Linköpings Universitet
- E. Klasén (2016) "Modeling and estimation of long-route EGR mass flow in a turbo-charged gasoline engine", Examensjobb vid Avdelningen för Fordonsystem, Linköpings Universitet
- C. Vilhelmsson (2017) "Compressible flow modeling with combustion engine applications", Examensjobb vid Avdelningen för Fordonsystem, Linköpings Universitet
- J. Storm (2017) "Heat transfer modeling for turbo-charger control", Examensjobb vid Avdelningen för Fordonsystem, Linköpings Universitet
- M. Wallson (2018) "Estimation of engine gas temperatures during pressure gradients", Examensjobb vid Avdelningen för Fordonsystem, Linköpings Universitet
- J. Lundqvist och A. Nordlöf (2018) "Turbo Heat transfer modeling for control", Examensjobb vid Avdelningen för Fordonsystem, Linköpings Universitet

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Modell-baserad metodik för design och implementering av motorstyrssystem är ett effektivt utvecklingsätt. Det lämpar sig både för konceptutveckling och produktionsprojekt. AVATAR-projektet har visat hur modellering, simulering och virtuell testning kan användas för att integrera olika "air-charge" system i motorstyrssystemen för komplexa drivlinor. Testning och mjukvaru-implementering har gjorts i verkliga motorsystem och test-rigggar. Resultaten har direkt kunnat överföras till kommande produktionsprojekt.

De detaljerade dynamiska modeller som tagits fram har hjälpt till att förbättra förståelsen av de komplexa sammansatta egenskaper som "air-charge" systemen har. Kunskaperna kan användas både för framtida konceptdesign och förbättrade styrsystems algoritmer.

AVATAR-projektet har etablerat ett väl fungerande samarbete mellan sektionen för "Engine Controls and Calibration" på Volvo Cars och Avdelningen för Fordonsystem vid Linköpings Universitet. Utbyte och gemensamma erfarenheter möjliggör effektiv överföring av forskningsresultat från universiteten, likväl som att forskningen kan riktas mot relevanta frågeställningar inom fordonsindustrin. AVATAR har genomfört återkommande M. Sc. examensarbeten med gemensam handledning från VCC och LiU. Universitetsstudenterna utgör en värdefull rekryteringsbas för Volvo.

8.1 Framtida forskningsområden

Några områden för fortsatt forskning listas nedan:

- Självlärande och autonoma regler-strategier, för förbättrad reglerprestanda och enklare användande i produktions- och koncept-projekt. Intressanta koncept att utreda är: "Model Predictive Control" (MPC) strategier, adaptiv reglering, "Machine Learning" applikationer och optimala, robusta flervariabla reglertekniker.
- Momentstyrning i hybrida drivlinor, för optimal prestanda och energiutnyttjande. Koordinerings-strategier mellan de olika momentgenererande delsystemen, kravnedbrytning och säkerställande av övergripande systemegenskaper. Standardiserad momentmodellering, karakterisering och interface-kommunikation.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

AVATAR projektet har varit ett samarbete mellan Volvo Car Corporation och Linköpings Universitet. Volvo har deltagit med seniora systemutvecklare och experter på motorstyrsystem algoritmer och implementering. Linköpings Universitet har haft en doktorand anställd i forskarskolan, på avdelningen för Fordonsystem, som har ansvarat för tekniska publikationer och studentprojekt-handledning. Man har också haft resurs för att driva motor-test-labb med mätutrustning och hårdvaruanpassningar.

Volvo Car Corporation (projektkoordinator)

Engine Controls and Calibration, 97540
SE-405 31 Göteborg, Sweden
+46 31 590 000

Kontakt: Marcus Rubensson (Principal Engineer)
marcus.rubensson@volvocars.com

Linköpings Universitet

Fordonsystem, Electrical Engineering
SE-581 83 Linköping, Sweden
+46 13 281 000

Kontakt: Lars Eriksson (Professor)
lars.eriksson@liu.se