

FROST: FörbrukningsReduktion – Optimal Strategi och verkTygslåda



Författare: [Henrik Svärd](#), [Svante Johansson](#),
Datum: [2021-03-17](#)
Projekt inom [Elektronik, mjukvara och kommunikation](#)

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English.....	4
3 Bakgrund.....	4
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	5
5 Mål	6
6 Resultat och måluppfyllelse	7
7 Spridning och publicering	8
7.1 Kunskaps- och resultatspridning	8
7.2 Publikationer.....	8
8 Slutsatser och fortsatt forskning	9
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	10

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

I strävan efter allt lägre bränsleförbrukning, koldioxidutsläpp och avgasemissioner, utvecklas drivlinan på kommersiella fordon till att bli alltmer komplex. Som ett steg i detta pågår utvecklingen av avancerade efterbehandlingsystem och elektrifiering av fordonet i form av bland annat hybridisering. För att dra full nytta av de möjligheter dessa utökade system utgör behovs styrstrategier som integrerar de olika systemen på ett effektivt sätt. Systemens påverkan på varandra gör att den mest energieffektiva styrstrategin av drivlinan är svår att bestämma. Ett metodiskt sätt att utforma effektiva styrstrategier är att använda sig av optimal styrteori i kombination med detaljerade modeller av drivlina och fordon. Resultaten kan användas direkt, genom optimering ombord i fordonet, där den optimala körstrategin beräknas i realtid, och indirekt, som underlag och hjälpmedel för att ta fram traditionella reglerstrategier. I dagsläget krävs goda matematiska kunskaper inom optimering, beräkningsmatematik och modellering för att tillgodogöra sig dessa metoder, vilket är anledningen till att metoderna huvudsakligen stannat i akademien. För att sänka instegströskeln och göra optimal styrteori tillgänglig i den industriellt verksamma ingenjörens strävan mot lägre bränsleförbrukning, sänkta koldioxidutsläpp och renare avgasemissioner, behöver verktyg och metoder för modellering, simulering och optimering utvecklas och förmedlas.

Projektet har genomförts som ett samverkansprojekt, där deltagare har varit ingenjörer vid Scania och doktorander med handledare vid Linköpings Universitet. Samverkansmöten har genomförts regelbundet för att snabba upp informationsutbyte och linjera forskningsinsatserna efter industrins applikationsbehov.

I en serie arbetspaket har forskare och studenter vid Linköpings Universitet tagit fram modeller av, och metoder för att optimera regleringen av fordonskomponenter. Speciellt för projektet har varit att de fordon som modelleras inkluderat hybridiserade fordon, med avancerad avgasefterbehandling. Studierna har även innefattat körning i fordonståg, s.k platooning.

Parallellt och i tätt kunskapsutbyte med arbetet på Linköpings Universitet har ingenjörer på Scania arbetat med att implementera utvecklade modeller och metoder i system närmare den industriella produktutvecklingen. Ett delresultat är implementerade optimeringsmetoder för framtagande av bästa möjliga körsätt för fordon med avancerade drivlinor, med tillhörande efterbehandlingsystem, både enskilt och i fordonståg. Dessa metoder utgör ett kraftfullt verktyg för konceptutvärdering av olika fordonskonfigurationer, och för genererande av optimala trajektorier som kan inspirera och tjäna som jämförelsematerial till mer traditionella regleralgoritmer. Dessutom har delar av resultaten av forskningen implementerats i styrsystemskod, och provkörts i det demonstratorfordon som utvecklats, en hybridiserad dragbil. Projektet har visat att det är fullt möjligt att implementera modeller och optimeringslösare på ett sådant sätt att de är exekverbara i realtid på befintlig styrsystemshårdvara, och att detta innebär både en förbättring av driftekonomin vid körning, och en minskning av kalibrerbördan i utvecklingsskedet.

Ett viktigt resultat av projektet är slutsatsen att bränsleoptimal styrning inte behöver stå i motsatsförhållande till ett väl fungerande efterbehandlingsystem för avgaser, utan att den styrstrategi som utvecklats i projektet snarare är gynnsam ur båda dessa perspektiv. Styrstrategin tenderar att växla mellan användning av förbränningsmotorn i driftpunkter med hög last och därmed hög verkningsgrad, och perioder med avstängd motor. Driftsättet ger hög avgastemperatur när förbränningsmotorn väl används, och låg avkylning av efterbehandlingsystemet när den inte gör det.

Projektet har också gjort viktiga framsteg inom området reglering av fordonståg. En komplicerande omständighet vid tillämpande av fordonståg är att korta avstånd från fordon till fordon lätt leder till bromsning för att undvika kollisioner, vilket gör att förbrukningsvinsten riskerar att minska eller till och med helt försvinna helt. I projektet har en reglermetod baserad på optimal styrning och förhandlingar mellan i fordonstågen ingående fordon tagits fram. Metoden visar på ett sätt att kombinera effektiv drivlinestyning med fordonståg, och är ett steg på vägen mot att kunna realisera besparingar från fordonståg i praktiken.

I projektet har också en verktygslåda för numerisk lösning av optimalstyrningsproblem utvecklats och gjorts kostnadsfritt tillgänglig på internet (www.yoptimization.com). Med hjälp av denna ges den praktiserande ingenjören möjlighet att utan detaljkunskaper kring optimal styrning, ändå dra nytta av avancerade lösningsmetoder för att optimera prestanda hos ett system med tillhörande reglering.

2 Executive summary in English

Due to the urgent need for reduction of greenhouse gas emissions, in particular those emanating from the transport sector, there is an ongoing push to make vehicles more efficient. As the diesel engine, still ubiquitous as energy converter, is a mature product with limited improvement potential, one possible path of increasing efficiency is through optimizing control strategies, thereby maximizing the utilization of available hardware.

In this project, methods for optimal control have been studied, and applied to minimize the greenhouse gas emissions of heavy vehicles. In particular for those vehicles that are equipped with multiple energy converters, for example an internal combustion engine and an electric machine, the problem of controlling the powertrain in the most fuel-efficient manner is non-trivial and optimal control methods have large potential in reducing emissions.

The project has been a collaboration between researchers at Linköpings University and engineers at Scania. Researchers at the university have developed methods and tools for optimal control, which have been implemented and tested, both in simulations, vehicle test cells and in road tests, at Scania.

The project work has shown that reductions in energy consumption may be obtained by applying optimal control strategies to hybrid vehicles. The reductions are in excess of the set goals of 2 % compared to a more conventional control strategy.

An important delivery from the project is an optimal control toolbox, made available on the internet (www.yoptimization.com), which significantly reduces the threshold for a practicing engineer to apply optimal control strategies, and thereby makes such methods accessible to a broader audience.

3 Bakgrund

De utmaningar som världen ställs inför gällande klimatförändringar orsakade av förbränning av fossila bränslen gör att fokus större än någonsin på minskning av koldioxidutsläpp.

För att minska klimatpåverkan från transportsektorn krävs effektivisering, både gällande utveckling av nya effektivare motorer, och genom styrning och reglering som möjliggör bästa möjliga utnyttjande av existerande tekniska system.

Även om förbränningsmotorn är en mogen produkt, och möjligheterna att öka dess effektivitet är begränsade, ger modern reglerteknik och optimal styrning möjligheter att minska utsläppen av växthusgaser genom att använda optimala styrstrategier. Speciellt för hybridfordon, med mer än en energiomvandlare, är det typiskt en icke-trivial uppgift att bestämma vilken styrstrategi som minimerar total energiförbrukning. Detta projekt handlar om att maximera nyttan med sådana komplexa drivlinor, genom användande av optimal styrningsmetoder.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Projektet har genomförts som ett samverkansprojekt, där deltagare har varit ingenjörer vid Scania och doktorander med handledare vid Linköpings Universitet. Samverkansmöten har genomförts regelbundet för att snabba upp informationsutbyte och linjera forskningsinsatserna efter industrins applikationsbehov.

Arbetspaket 1-3 har utförts i första hand av forskare och doktorander på Linköpings Universitet
Arbetspaket 4-6 har utförts i första hand av ingenjörer på Scania
Arbetspaket 7-8 LiU har utförts i första hand av forskare och doktorander på Linköpings Universitet

Nedan beskrivs i korta ordalag i vilken form arbetet i respektive arbetspaket har utförts. Resultaten diskuteras i avsnittet "Resultat" nedan.

Arbetspaket 1 Optimering av hybridfordon

På Linköpings Universitet har forskning bedrivits kring hur, i detalj, den optimala regleringen av hybrida drivlinor skall utföras. Arbetet har inneburit modellering av hybrida drivlinor, optimering av olika förlopp, och analys som ökat förståelsen kring hur fördelarna av hybridisering av tunga fordon bäst tas tillvara.

Arbetspaket 2 Avgas efterbehandling inkluderad i optimeringen

Arbete i arbetspaketet har bland annat bedrivits av Fredrik Andersson och Hampus Andersson, båda studenter på Linköpings Universitet, i examensarbetet Numerical Optimal Control of Hybrid Electric Trucks: Exhaust Temperature, NOx Emission and Fuel Consumption, där metoder för modellering av en hybridiserad fordonsdrivlina med tillhörande efterbehandling studerats. Resultaten diskuteras under rubriken resultat.

Arbetspaket 3 och 6 Platooning med avancerad drivlina

Platooning har bland annat studerats av i ett examensarbete utfört av Philip Ahl: "System for cooperative platooning using microtransactions", i examensarbetet "Optimal Platooning of Heavy-Duty Vehicles", utfört av Rikard Olsén och Erik Sten och i examensarbetet "Optimal formation of heavy duty vehicle platoons", utfört av Dennis Edblom.

Arbetspaket 4 Implementering av hybridmodeller och optimering

Ett kontinuerligt pågående arbete under projektets gång har varit att omsätta kunskap som framkommit i övriga arbetspaket till funktioner i den demonstratorbil som projektet arbetat med på Scania. På så sätt har teoretiska modeller kunnat testas och verifieras, genom provkörningar med fordon både på väg och i provcell.

Arbetspaket 5 Implementering av efterbehandlingsmodeller och optimering

De prov som gjorts med fordonsstyrning utan modellering av avgasefterbehandling har visat att minimering av bränsleförbrukning i sig i de flesta körfall leder till höga efterbehandlingstemperaturer, och därmed god funktion hos efterbehandlingssystemet. Beslut har därför tagits i projektet om att modellering av avgasefterbehandlingen inte är nödvändig i reglerstrategin.

Arbetspaket 7 Utveckling av verktyg för optimal styrningsproblem

Arbetet med optimalstyrnings-verktygslådan YOP har fortgått på Linköpings Universitet, och verktygslådan har lanserats och gjorts kostnadsfritt tillgänglig på internet (www.yoptimization.com).

Arbetspaket 8 Optimeringsmetoder och dess inverkan på bränsleprestandan

På Linköpings universitet har arbete utförts, som utmynnat i ett flertal rapporter och exjobb kring olika metoder för optimering, se avsnittet publikationer nedan.

5 Mål

I den ursprungliga projektansökan beskrevs projektets mål enligt följande:

Det föreslagna projektets övergripande mål är att utveckla metoder och verktyg som kan användas vid utveckling av nya miljövänliga fordon, vilket ökar forsknings- och innovationskapaciteten i Sverige och därmed säkrar fordonsindustriell konkurrenskraft och arbetstillfällen.

Projektet kommer även att främja samverkan mellan industri och universitet, genom att universitetet kan erhålla relevanta forskningsuppslag från Scania och att forskningsresultat från universitetet blir tillgängliga för ingenjörer i industrin.

I den strategiska färdplanen för delprogrammet "Elektronik, mjukvara och kommunikation" beskrivs i mer konkreta ordalag vilka teknologier som behövs för att möjliggöra funktioner som bidrar till de övergripande FFI-målen. Projektet är i första hand relevant inom programområdet "Green, Safe and Connected functions", där syftet bland annat är att utveckla basteknologi för att realisera funktioner som reducerar fossilberoende. Detta stämmer väl med projektets mål att ta fram strategier för att utnyttja avancerade drivlinor på ett optimalt sätt.

En hybriddrivlina för ett tungt fordon är mycket komplex, och det är därför inte uppenbart hur den bör styras för att minimera bränsleåtgången för ett givet köruppdrag. Ett av målen med att applicera optimeringsmetoder på problemet är att få en uppskattning av potentialen, det vill säga den minsta möjliga bränsleåtgången för en given fordonskonfiguration. Detta i sig är intressant som jämförelsegrund för andra, enklare reglerstrategier. Det är alltså svårt att i förväg avgöra hur mycket besparing projektet kan leda till, men baserat på tidigare erfarenhet av arbete med optimeringsbaserade reglerstrategier för traditionella drivlinor, uppskattas att en ytterligare bränslebesparing på 2 % är möjlig att uppnå, jämfört med regelbaserad styrning.

6 Resultat och måluppfyllelse

Scania har fortsatt att utveckla den simulerings- och optimeringsmiljö som togs fram under FFI projektet "OPERA II", med hjälp av vilken optimala bränslebesparande trajektorier kan tas fram för hybridiserade fordon och elfordon. Med hjälp av denna miljö har reglerstrategier tagits fram, som använts i andra projekt på Scania. Bland annat har resultaten med stor framgång använts för att i ett tidigt skede simulera vägkörning med hybridiserade fordon i motorprovcell. I motorprovcell har mätningar visat att när optimerade last/varvtalsspår körs, så används förbränningsmotorn typiskt i lastpunkter med hög last, vilket är gynnsamt för att behålla temperaturen i avgasefterbehandlingssystemet. Mellan pulserna av hög last stängs motorn av, vilket helt eliminerar det kylande flöde av kalla avgaser som tomgång eller släpning genererar. Detta resultat visade att en bränsleoptimal styrning av förbränningsmotorn också är gynnsam för avgasefterbehandlingssystemet, och slutsatsen drogs att modellering av avgasefterbehandlingen inte är nödvändig i reglerstrategin. Detta resultat förenklar regleringen avsevärt och är en mycket intressant lärdom av projektarbetet. I speciella driftsfall, där ytterligare åtgärder krävs för att erhålla tillräcklig temperatur i efterbehandlingssystemet, har forskningen visat på intressanta tvåfas-strategier för uppvärmning. Den första fasen syftar där till att generera värme, och den andra till att generera flöde genom efterbehandlingssystemet, för att sprida värmen från den första fasen.

Med utgångspunkt i optimeringsmiljön har en online-optimerare tagits fram, som ombord på fordonet tar fram reglerstrategier för förbränningsmotor och hybridsystem. Systemet bygger på så kallad modellprediktiv reglering (Model Predictive Control, MPC), och innebär att en optimeringslösare tar fram den mest optimala körstrategin för den närmaste vägsträckan, typiskt några kilometer, och använder denna strategi för att framföra fordonet. Så fort en optimering är färdig startas en ny, med optimeringshorisonten framflyttad allt eftersom fordonet rör sig på vägen. Implementationen har skett i ordinarie växellådsstyrenhet, vilket har inneburit begränsningar beräkningskapacitet, men i gengäld ökar relevansen av projektet för fortsatt industriellt utvecklingsarbete jämfört med att använda för ändamålet extrainsatta beräkningsdatorer.

Ett demonstratorfordon har byggts under projektets gång, i form av en dragbil med en effektiv förbränningsmotor, restvärmeåtervinning från avgaserna (WHR), och ett hybridsystem. Alla för körning nödvändiga aggregat är elektrifierade, vilket möjliggör körning med förbränningsmotorn helt avstängd. Demonstratorn har använts för prover av MPC-farthållaren, både på väg och i provcell. Resultaten visar att de uppsatta målen på 2 % ytterligare bränslebesparing jämfört med en konventionell styrning är uppnådda med råge.,

Studier av hur fordonståg, s.k. *platooning*, skall utföras för att kunna kombinera bränslevinster från avancerad drivlinestyning och minskade fordon till fordon-avstånd har utförts bland annat genom ett examensarbete av Philip Ahl på Scania. I examensarbetet togs en ny metod fram för att låta fordonen förhandla sinsemellan om sina respektive hastighetstrajektorier. Genom att tillämpa metoden erhålls körstrategier som är alla fordon till gagn, inte bara de bakre fordonen i fordonståget. Metoden redovisas i den publicerade rapporten, och har även patentsökts i Sverige.

Arbetet på Linköpings Universitet har bland annat mynnat ut i den verktygslåda för lösning av optimal styrnings-problem som tillgängliggjorts på internet (www.yoptimization.com). Verktygslådan inkorporerar kunskap och resultat från forskning kring hur bland annat fordonssystem bäst modelleras, regleras och optimeras, och möjliggör för den praktiserande ingenjören att tillämpa optimal styrning i sitt dagliga arbete. Verktygslådan har redan kommit till

användning i ett flertal forskningsarbeten, se till exempel Ekberg och Eriksson (2019), Ekberg och Eriksson (2020) och Ekberg, Eriksson och Sundström (2021).

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	
Introduceras på marknaden		
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut		

7.2 Publikationer

Vetenskapliga artiklar och konferensbidrag

Ekberg, Leek, Eriksson (2017) *Optimal Control of Wastegate Throttle and Fuel Injection for a Heavy-Duty Turbocharged Diesel Engine During Tip-In*. SIMS 2017

Leek, Eriksson (2017) *Turbocharger Impact on Diesel Electric Powertrain Performance*, SAE WCX 2017

Ekberg, Leek, Eriksson (2018) *Validation of an Open-source Mean-Value Heavy-Duty Diesel Engine Model*, SIMS 2018

Ekberg, Leek, Eriksson (2018) *Modeling and Validation of an Open-Source Mean Value Heavy-Duty Diesel Engine Model*. Simulation notes Europe: SNE 28(4), 2018, 197-204

Johansson, Ekberg, Eriksson (2018) *Time Optimal Turbocharger Testing with a Known Map*, E-COSM 2018

Johansson, Eriksson (2019) *System identification, trajectory optimization and MPC for time optima turbocharger testing in gas-stands with unknown maps*, SAE WCX 2019

Kristoffer Ekberg, and Lars Eriksson (2019). *Development and Analysis of Optimal Control Strategy for Gear Changing Patterns During Acceleration*. IFAC Symposium on Advances in Automotive Control. Volume 525. Orléans, France, pp. 316--321.

Kristoffer Ekberg, and Lars Eriksson (2020). *A Comparison of Optimal Gear Shifts for Stiff and Flexible Driveshafts During Accelerations*. 21st IFAC World Congress. Berlin, Germany.

Kristoffer Ekberg, Lars Eriksson, and Christofer Sundström (2021) . *Electrification of a heavy-duty CI truck - Comparison of electric turbocharger and crank shaft motor*. Energies. 2021; 14(5):1402

Examensarbeten

Ahl, Philip. (2020) *Optimal Cooperative Platooning Using Micro-Transactions*. Examensarbete, Uppsala Universitet, UPTec F nr 20027

Ohlsén, Rikard, och Sten, Erik (2018). *Optimal Platooning of Heavy-Duty Vehicles*. Examensarbete, Linköpings Tekniska Högskola, LiTH-ISY-EX--18/5119--SE

Andersson, Fredrik, och Andersson, Hampus (2018)
Numerical Optimal Control of Hybrid Electric Trucks: NOx, Emission and Fuel Consumption. Examensarbete, Linköpings Tekniska Högskola, LiTH-ISY-EX--18/5137—SE

Bodin, *Development of Push Control Strategy for Diesel-Electric Powertrains*, Examensarbete, Linköpings Tekniska Högskola, LiTH-ISY-EX--18/5168—SE

Green, *Development of a 2D Optimal Path Simulation for Ship-to-Shore Cranes: Safe Trajectories within Interchangeable Obstacle Environments*, Examensarbete, Linköpings Tekniska Högskola, LiTH-ISY-EX--20/5280—SE

Hall, Forsberg, *Reduced Fuel Consumption of Heavy-Duty Vehicles using Pulse and Glide*, Examensarbete, Linköpings Tekniska Högskola, LiTH-ISY-EX--19/5243—SE

Edblom, *Optimal Formation of Heavy Duty Vehicle Platoons*, Examensarbete, Linköpings Tekniska Högskola, LiTH-ISY-EX--20/5310—SE

Patent

Ahl, P., Johansson, S., Svärd, H. *System for cooperative platooning using microtransactions* (patent sökt)

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Under projektet har drivlinestyning baserad på optimering studerats ur ett antal synvinklar. Arbetet visar att det är möjligt att formulera relevant optimeringsbaserad styrning och exekvera den på befintlig styrenhetshårdvara, och att styrningen kan ge icke försumbara förbättringar av bränsleekonomin hos ett hybridiserat fordon. En slutsats som kanske är ännu starkare är att den optimeringsbaserade styrningen minskar kalibrer bördan, och att uppdaterade systemmodeller direkt ger genomslag i regleringen, vilket innebär en stor skillnad jämfört med mer traditionell regelbaserad reglering.

Forskningen har visat att en bränsleoptimal reglering i många sammanhang även bidrar till ett bra fungerande avgasefterbehandlingssystem. Vid vanlig körning räcker det därför att minimera bränsleförbrukning, vilket minskar komplexiteten i reglerproblemet. I speciella driftsfall, till exempel kallstart där det gäller att fort få efterbehandlingssystemet varmt, behöver dock särskilda åtgärder vidtas. De arbeten som har gjorts har visat på en ny tvåfas-strategi för

värmning av efterbehandlingssystem, där den första fasen genererar värme, och den andra sprider värmen i katalysatorn med hjälp av högt avgasmassflöde.

En annan slutsats av forskningen är att kooperativa fordonståg går att kombinera med avancerad drivlinestyrning där den individuella fordonshastigheten varierar mellan fordonen i fordonståget. Avvägningen mellan förbrukningsvinst av korta avstånd mellan fordon och förbrukningsvinst av varierande hastighet är ett bra exempel på ett problem där optimal styrning kan göra stor nytta.

Ett flertal områden har identifierats där fortsatt forskning krävs:

- När högre grad av hybridisering och rena elfordon skall regleras, kommer fokuset på dieselförbrukning att förskjutas mot ett fokus på batterier och sätt att minska degradering av dessa. Exempel på frågor som behöver besvaras är hur batteriernas degradering skall modelleras, och deras tillstånd skall inkorporeras i en drivlinestyrning.
- I framtiden kan andra energiomvandlare än dieselmotorn bli aktuella som komplement till den rena batteridriften, till exempel bränsleceller. Hur dessa skall modelleras och styras är en fråga för vidare forskning.
- En återkommande fråga gällande användning av optimering för reglering är den om stabilitet och konvergens. För större genomslag skulle metoder för analys av dessa egenskaper behöva tas fram.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Jonas Holmborn, Scania

jonas.holmborn@scania.com

Lars Eriksson, Linköpings Universitet

lars.eriksson@liu.se