



**LUNDS**  
UNIVERSITET

# Återkoppling för effektiv och förblandad förbränning

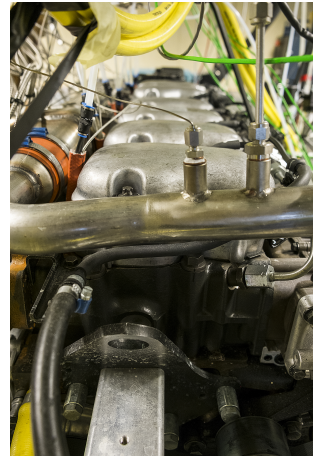
Gabriel Turesson  
Institutionen för Reglerteknik

Populärvetenskaplig sammanfattning av doktorsavhandlingen *Model-Based Optimization of Combustion-Engine Control*, juni 2018. Avhandlingen kan laddas ner från: <http://www.control.lth.se/publications>

Krav på minskade utsläpp och en minskad bränsleförbrukning har de senaste decennierna påskyndat förbränningsmotorns teknikutveckling. Vid Lunds Universitet har det under en längre tid forskats på lågtemperaturförbränning där tändfördröjningen, tiden mellan bränsleinsprutning och förbränningsstart förlängs för att öka blandning av bränsle och luft.

En ökad blandning ger mer homogena förbränningszoner och leder till reducerade förbränningstemperaturer. Detta kan minska bildning av både kväveoxider och sotpartiklar. Den reducerade förbränningstemperaturen leder också till minskade värmeförluster vilket ökar förbränningsmotorns termodynamiska verkningsgrad. Under senare år har ett förblandat förbränningskoncept, partiellt förblandad förbränning (PPC), tagits fram. Detta koncept har under vissa driftpunkter uppvisat indikerade verkningsgrader över 50 % med emissioner som understiger dagens lagkrav utan efterbehandling. Konceptet bygger på att bränsle sprutas in tidigt under kompressionstakten och att bränsle med bensinlikt oktantal används tillsammans med höga halter avgasåterledning.

Utmaningen med förblandad lågtemperaturförbränning är den ökade känsligheten för temperatur och gaskomposition i förbränningskammaren. Detta är ett resultat av att förblandad förbränning till en högre grad styrs av kemiska reaktionshastigheter jämfört med konventionell dieselförbränning där förbränningsförloppet styrs av hur snabbt bränsle och luft blandas. Om bränsleinsprutningen sker för sent under kompressionstakten och temperaturen är för låg riskerar tändfördröjningen att bli för lång. Detta leder till ofullständig förbränning med låg verkningsgrad och höga utsläpp som resultat. Om bränsleinsprutningen å andra sidan sker för tidigt och en stor mängd bränsle antänds samtidigt kan det leda till knockning



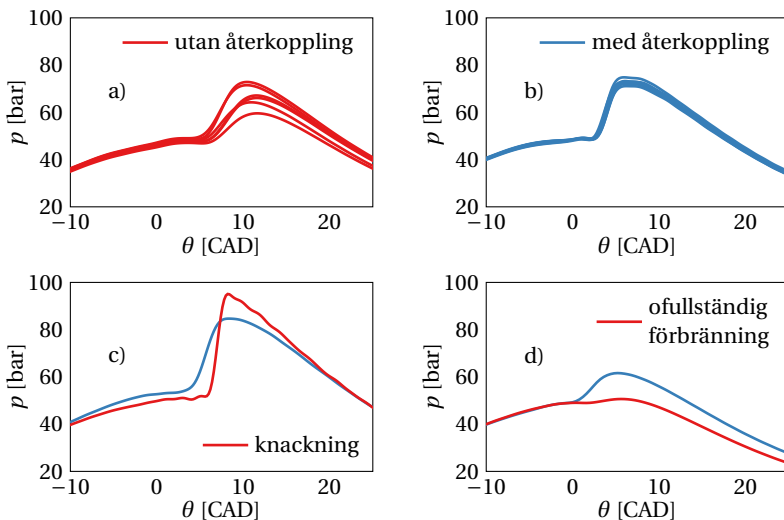
*En Scania lastbilmotor, som använts för experiment i avhandlingen.*

med våldsamt förbränningshastighet. Detta ger oacceptabelt höga ljudnivåer och kan leda till motorskador.

Reglerteknik handlar om att få processer och system att automatiskt uppföra sig på önskat sätt. I fallet förblandad förbränning handlar reglerteknik om att bestämma tidpunkter och durationer för bränsleinsprutningspulser så att förbränningstidpunkt och tändfördröjning hålls vid förutbestämda referensvärden. Detta för att förbränningen ska ske så effektivt som möjligt och att knockning och ofullständig förbränning undviks. Detta medan motorns last och varvtal varierar.

Den här avhandlingen studerar design av regulatorer som styr förbränningen med hjälp av cylindertryckssensorer. Den här typen av regulator registrerar trycket i förbränningskammaren varje motorvarv. Cylindertrycket analyseras, och en tiondels sekund senare ska regulatorn ha tagit ett beslut för hur bränsleinsprutningen ska justeras för att förbränningen ska ske på önskat sätt under nästa cykel.

För att regulatorn ska ta rätt beslut används matematiska modeller som beskriver relationen mellan bränsleinsprutning och förbränningsförloppet. Regulatorn använder modeller för att beräkna hur bränsleinsprutningen ska korrigeras. I den här avhandlingen sker detta med hjälp av optimeringsalgoritmer, där framräknade ändringen i bränsleinsprutning minimerar en kostnadsfunktion som reflekterar önskad förbränning. Därav det engelska namnet på avhandlingen: "Model-Based Optimization of Combustion-Engine Control". Modellbaserad reglering är ett systematiskt sätt att reglera system med flera styr och mätsignaler. Förbränningsmotorn är ett exempel på ett sådant system där antalet sensorer och aktuatorer har ökat de senaste åren i takt med att ny och mer avancerad teknik har införts för att krav på emissioner och bränsleförbrukning ska uppfyllas.

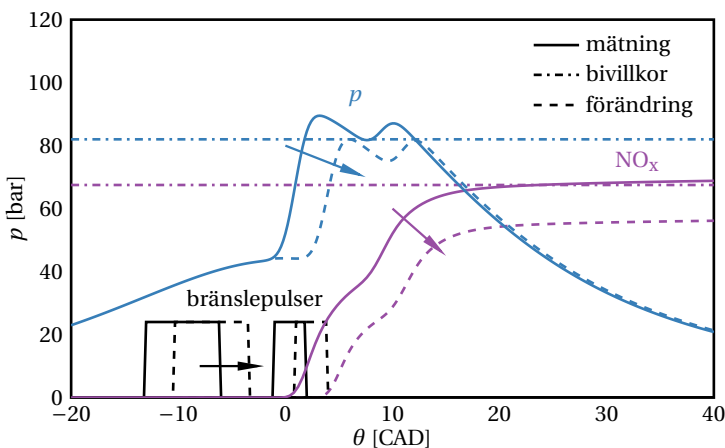


Cylindertryck som funktion av vevinkelgrad. Diagram a)-d) illustrerar utmaningarna med förblandad förbränning och potentiell förbättring med förbränningsåterkoppling.

I avhandlingen presenteras regulatorer som styr förbränningstidpunkt, tändfördröjning och förbränningstakt. Utgångspunkten är att det förblandade förbränningskonceptet PPC ska kunna köras i kommersiella förbränningsmotorer. Den experimentella utvärderingen har genomförts i motorlabb vid Lunds universitet, där en kommersiell lastbilmotor från Scania har körts med högoktanigt bränsle och ett egenutvecklat styrsystem.

Cylindertryck som funktion av vevinkelgrad presenteras i figuren ovan för några driftfall. Dessa fall illustrerar utmaningarna med förblandad förbränning. Effekten av återkoppling illustreras i diagram b) där bränsleinsprutningspulser har justerats för att korrigera för variation i producerat arbete och förbränningstidpunkt mellan olika cylindrar. Variation i cylindertryck har reducerats i diagram b) jämfört med diagram a) där bränsleinsprutningen är likadan för de olika cylindrarna. Diagram c) och d) visar knackning och ofullständig förbränning (röd), tillsammans med mer acceptabla cylindertryck (blå), som har uppnåtts automatiskt med hjälp av förbränningsåterkoppling.

Avhandlingen undersöker också hur fysikaliska modeller kan användas för att beräkna hur bränsleinsprutningspulser ska anpassas för att bivillkor med avseende på cylindertryck, kväveoxider ( $\text{NO}_x$ ) och avgastemperatur ska uppfyllas effektivt. Denna metod illustreras i figuren nedan, där en regulator använder uppmätt cylindertryck (—) och en cylindertrycksmodell för att prediktera hur bränsleinsprutningspulser ska justeras (...) så att bivillkor (---) i form av en övre gräns för cylindertryck ( $p$ ) och  $\text{NO}_x$  emissioner ska uppfyllas. En experimentell utvärdering visar att en återkopplad uppdelning av förbränningen i flertalet förbränningspulser kan öka verkningsgraden med upp till 5 % vid restriktiva bivillkor för maximalt cylindertryck och  $\text{NO}_x$  emissioner.



Figuren illustrerar hur en regulator beräknar förändring i bränsleinsprutningspulser för att uppfylla bivillkor med avseende på cylindertryck ( $p$ ) och  $\text{NO}_x$  emissioner.