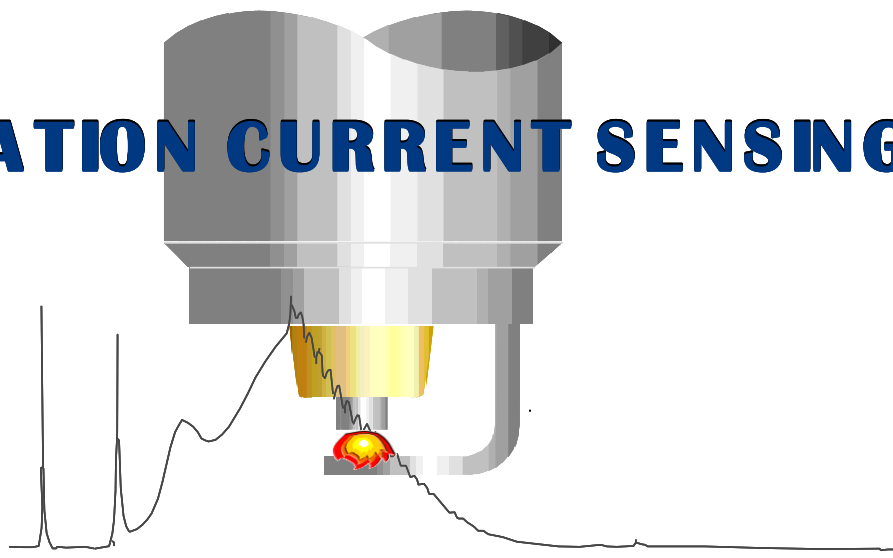


IONIZATION CURRENT SENSING



Jakob Ängeby, Anders Göras, Jan Nytomt
Hoerbiger Control Systems AB

Maj 2012

SGC:s FÖRORD

FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för en var intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat eller dylikt i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns på SGC:s hemsida www.sgc.se.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD).

SGC har följande delägare:

Energigas Sverige, E.ON Gas Sverige AB, E.ON Sverige AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energikoncernen AB (publ) och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

MAN Diesel
Hoerbiger Control Systems
Energimyndigheten

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Martin Ragnar

SAMMANFATTNING

Jonströmsmätning ger information om förbränningen i cylindrarna i en förbränningsmotor under drift, cykel för cykel. Jonströmsteknik har använts i bensinmotorer en längre tid för detektering av knock, misständning, förbränningsstabilitet och i viss mån luft-bränsleförhållande. Användningen i gasmotorer har emellertid varit mycket begränsad.

Projektet syftade till att via experiment kartlägga i vilken omfattning det går att få fram information om förbränningsprocessen då naturgas används som bränsle vid drift av industriella magermotorer och där förkammare används för tändning. Denna typ av motor innebär att mätsensorn (tändstiftet) sitter inkapslat i nämnd förkammare.

Experimenten visar att jonström mätt i förkammaren i industriella magermotorer innehåller mycket information om förbränningsprocessen. Man kan detektera misständning och i viss mån knock. Vidare kan man med hjälp av jonströmsmätning optimera förbränningen i förkammaren så att en stabil förbränning i huvudkammaren uppnås och i och med detta lägre emissioner och ökad verkningsgrad.

En statistisk ansats för analys av jonströmsdata har testats på en naturgasmotor för tunga fordon. Genom att använda flera indikatorer som viktas ihop på ett optimalt sätt kan noggrannheten på skatting av luft till bränsle blandningen förbättras.

SUMMARY

Ion current measurements give information on the combustion in the cylinders of an internal combustion engine in run time, cycle by cycle. Ion sense has been used in gasoline engines for many years for detection of knock and misfire, combustion stability and for air to fuel ratio estimation. However, the use of ion sense in industrial gas engines has been limited, despite the potential of ion sense.

The objective with the project is to investigate which combustion process information that can be retrieved using ion sense applied to industrial lean burn engines using pre-chambers for the ignition in which case the spark plug is encapsulated in the pre-chamber.

Experiments show that ion current measured in the pre-chamber can successfully be used to retrieve information from the in-cylinder combustion process. It is possible to detect misfire and to some extent knock. It is also possible to optimize the ignition and hence minimize emissions and optimize the performance by using the ion current measured in the pre-chamber.

A statistical signal processing approach to use more than one ion current feature in the estimation of combustion parameters was evaluated on a heavy duty gas engine. By using more than one feature the performance of in cylinder air to fuel ratio estimation was improved.

INNEHÅLL

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Mål	3
1.3	Ordlista.....	4
2	Jonströmsteknik.....	5
3	Projektets genomförande	7
4	Analys av mätdata	8
4.1	Industriell gasmotor med förkammare	8
4.1.1	Generella observationer	9
4.1.2	Knack.....	9
4.1.3	Misständning.....	12
4.1.4	Optimering av förbränningsstabilitet.....	15
4.1.5	Minskade avgaser med jonströmsteknik.....	20
4.1.6	Tryckmax i huvudkammaren	22
4.2	Gasmotor till tunga fordon	24
4.2.1	Bakgrund.....	25
4.2.2	Statistisk signalbehandlingsansats	25
4.2.3	Experimentets genomförande	26
4.2.4	Resultat	27
5	Sammanfattande diskussion och slutsatser	29

REFERENSER

1. INLEDNING

1.1 BAKGRUND

Gas är ett drivmedel till förbränningsmotorer som snabbt ökar i betydelse på grund av de låga emissionerna och den låga kostnaden. Antalet förbränningsmotorer som drivs med naturgas blir fler och deras betydelse ökar. Exempel på vanliga användningsområden är gasmotorer i bussar och större industriella motorer. Industriella gasmotorer används i ett flertal sammanhang som t.ex. för att pumpa gas i transportnät (pipelines) eller för att driva generatorer som producerar elkraft till industrier och samhällen. Dessa motorer kan generera effekter upp till flera megawatt.

Denna rapport är generell och är inte inriktad på en specifik motor från någon speciell leverantör utan riktar sig mot den generella applikationen industriella gasmotorer. För att ge läsaren en uppfattning om hur stora och kraftfulla sådana motorer kan vara kan nämnas att dessa motorer kan ha från 6 till 24 cylindrar och leverera effekt från några hundra kilowatt upp till fem megawatt. De kraftfullaste motorerna kan vara fyra meter höga, tio meter långa och med en vikt på ca 50 ton. Som jämförelse kan nämnas att en typisk bilmotor har fyra cylindrar och är på ca 150 kilowatt och väger i storleksordningen 150 kilo.

Exempel på leverantörer av motorer är MWM, Wärtsilä, MAN och Rolls Royce m.fl.

Användningsområden för industriella gasmotorer är flera. De kan t.ex. användas för att driva generatorer eller för att driva fartyg eller som de i Fig. 1, för att pumpa gas i stora gasledningar över kontinenter.



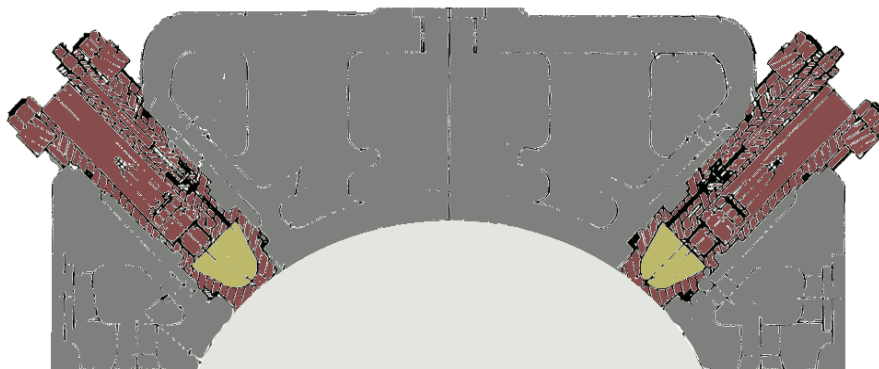
Figur 1. En maskinhall med många industriella gasmotorer som används för att pumpa gas över gasledningar i USA.

Det ställs höga krav på industriella motorer. De måste vara mycket driftsäkra med en hög verkningsgrad och emissionerna måste vara låga (1). För att kunna tillmötesgå dessa krav behövs en diagnos av förbränningen i cylindrarna så att eventuella avvikelser från en optimal förbränningsprocess kan detekteras och automatiskt korrigeras eller, ifall avvikelsen beror på ett fel, åtgärda felet.

Exempel på feltillstånd i en motor kan vara:

- ✓ Antändningen av gasblandningen i en cylinder inte är tillräckligt bra. Då frigörs inte energin i bränslet vid rätt fas och gasblandningen brinner under förhållanden som ger ökade emissioner. Detta kan leda till kraftigt sänkt verkningsgrad och ökade föroreningar. Detta kan t.ex. inträffa om själva antändningen är för dålig eller om bränsleblandningen är för mager (utspädd) och därmed svår att antända.
- ✓ Mängden tillfört bränsle avviker från det som skulle ha gett en optimal förbränningsprocess (för fet eller mager bränsleblandning). En för mager bränsleblandning i s.k. magermotorer (motorer som drivs med överskott av syre relativt tillfört bränsle) leder till ojämn drift. En för fet blandning i förkammaren leder till ökade emissioner.

För att åstadkomma en bra antändning i motorer som körs med mycket luft relativt bränsle (magerdrift) används ofta så kallade förkammare, se Fig. 2, där ett tvärsnitt av en industriell motor som drivs med naturgas visas. En förkammare består av en liten kammare som är försedd med ett tändstift. Förkamrarna (två i detta fall) fylls med en relativt fet luft-bränsleblandning (mycket bränsle) och förbränningen i förkammaren sker under nära stökiometrisk förhållanden. Den brinnande gasen sprutar ut från förkammarens hål in i huvudkammaren (cylindern) där den i sin tur antänder den magra bränsleblandningen. Det har emellertid visat sig att förkammare kan orsaka höga emissioner om de laddas med för feta bränsleblandningar. För magert är inte heller bra, för då blir antändningen sämre. Det är viktigt att bränsletillförseln i förkamrarna är exakt rätt för att uppnå optimal drift och låga emissioner. Detta är en stor utmaning eftersom det är svårt att mäta vad som händer i förkamrarna.



Figur 2. Tvärsnitt av cylinderhuvud med två förkammare för antändning av magra bränsleblandningar.

De ökade miljökraven leder till att man vill kunna mäta hur förbränningen är i varje enskild förkammare och cylinder under drift. Miljön i motorns cylindrar är emellertid aggressiv och det är svårt och dyrt att genomföra mätningar. Några metoder för att utvinna information om förbränningen är:

- Mätning av motorns vevinkelhastighet genom att mäta svänghjulets rotationshastighet (2, 3).
- Lambdagivare som mäter syrehalten i avgaserna (4).
- Tryckgivare i cylindrarna (5).
- Jonströmsmätning via tändstiftet (6, 7).

Mätning av svänghjulets rotationshastighet kan användas för att detektera misständning och i viss mån obalans mellan cylindrarna. Problem med denna metod uppstår då motorn har många cylindrar (ca 10 eller fler) och då inte kan ge någon specifik information om förbränningen i en enskild cylinder.

Lambdagivarna ger information om relationen mellan luft och bränsle. Utmaningen med lambdasensorer är bl.a. begränsad livslängd, kostnad och att det kan vara svårt att veta från vilken cylinder avgaserna kommer ifrån. Lambdasensorer ger inte specifik information om förbränningen i förkamrarna.

Tryckgivare ger mycket information om förbränningsprocessen i cylindern. Problemet med tryckgivare är den begränsade livslängden samt kostnaden som är relativt hög. En tryckgivare monterad i huvudkammaren ger ingen information om förbränningen i förkammaren.

Jonströmsmätning är relativt billig eftersom denna teknik utnyttjar det befintliga tändstiftet. Vidare är jonströmsteknik känd för att innehålla mycket information om förbränningsprocessen. Problemet med jonströmsteknik är att det kan vara svårt att extrahera robust information från signalen på grund av att den påverkas av många faktorer.

Den viktigaste skillnaden mellan jonströmsmätningar på en bensinmotor och en magerdriven gasmotor är att sensorn (tändstiftet) sitter i förkammaren på gasmotorn. Sensorn är då inte direkt utsatt för huvudkammarens joniseringsprocesser utan mäter indirekta effekter av den i förkammaren. Det finns behov av förbättrad teknik för att utvinna information om förbränningsprocessen i cylindrarna från jonströmsmätningar vilket har varit fokus för detta projekt. Mer om vad jonströmsteknik är följer i Kapitel 2.

1.2 MÅL

Projektet har haft som mål att öka kunskapen kring jonströmsteknik och därmed förbättra tolkningen av jonströms signaler från industriella gasmotorer. Vi ville bland annat öka förståelsen för hur man skall kunna utvinna information från varje enskild cylinder och förbränning med avseende på:

- Detektion av knack och misständning
- Optimering av bränsle-luftblandningen i förkammaren med avseende på stabil antändning av bränslet i huvudkammaren.
- Skattning av förbränningsrelevanta parametrar som t.ex.
 - Förbränningsfasning (tryckmax)

- Luft till bränsleblandning (AFR)
- Förbränningsstabilitet (COV)

1.3 ORDLISTA

AFR Air to Fuel Ratio, förhållandet mellan mängden luft och bränsle.

MFB50 Mass fraction Burned 50%, den vevinkelgrad då 50% av bränslet har brunnit

CAD Crank Angle Degree, vevinkelgrad.

COV Coefficient of Variation, mått på förbränningsstabiliteten.

IT Ignition Timing, den vinkel vid vilken gnista tänds.

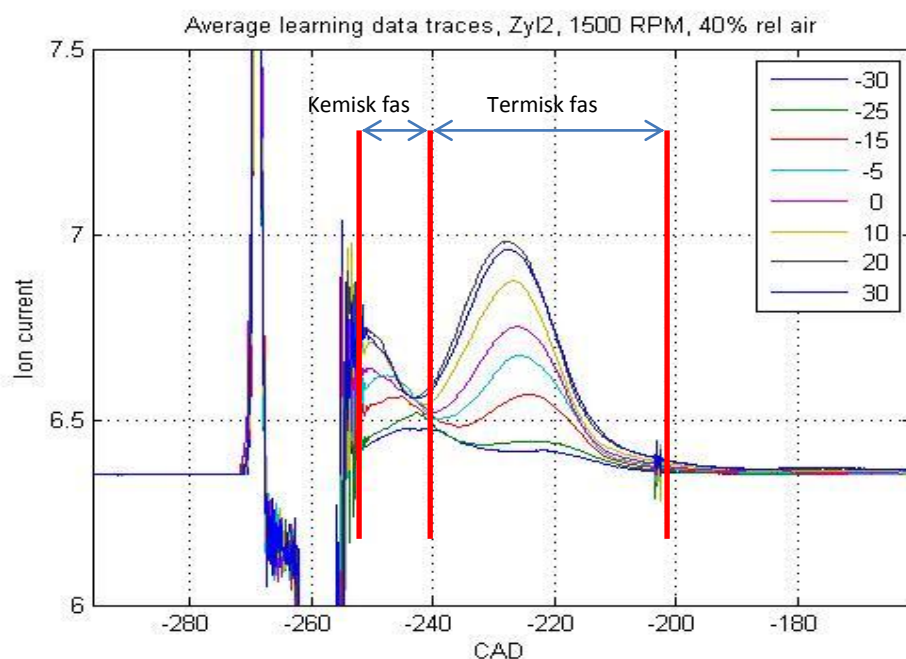
IMEP Indicated Mean Effective Pressure

2 JONSTRÖMSTEKNIK

I detta kapitel ges en kort sammanfattning av vad jonström är för något och hur man kan mäta den.

Då luft och bränsle brinner är det en kemisk reaktion mellan syret i luften och kolväten i bränslet under vilken värmeenergi frigörs. Denna kemiska process är en kedjereaktion. I några av de första stegen bildas fria elektroner och laddade joner. De fria elektronerna tas strax upp av de positiva jonerna varvid antalet laddade partiklar reduceras. Men när tryck och temperatur ökar i cylindern allteftersom bränsle brinner så slås en del molekyler isär och det bildas återigen fria elektroner och joner. Den första fasen benämns kemisk fas och den andra fasen benämns termisk fas.

Det typiska utseendet på jonström från en bensinmotor (utan förkammare) ser ut som i 0 som visar medelvärdet av jonström vid olika AFR. I Fig. 3 varierades AFR genom att ändra mängden insprutat bränsle från -30 % till +30 % jämfört med stökiometrisk AFR. Man kan tydligt se den kemiska och den termiska fasen i jonströmmen. Vidare ser man att jonströmintensiteten varierar med AFR på så sätt att den ökar med mängden bränsle upp till en viss gräns då den börjar avta igen. Exempel på en motsvarande mätning i en magermotor där jonströmmen mäts i förkammaren finns i Fig 5 i kapitel 4. Jonström i en industriell gasmotor med förkammare skiljer sig avsevärt från jonström i en liten bensinmotor. I Kapitel 4.1 kommer vi att se att jonströmmen är helt annorlunda i en stor industriell gasmotor som körs magert (överskott av lyft) och då jonströmmen mäts i förkammaren. Det krävs ny kunskap för att utvinna relevant förbränningsinformation ur sådan jonströmsmätning.

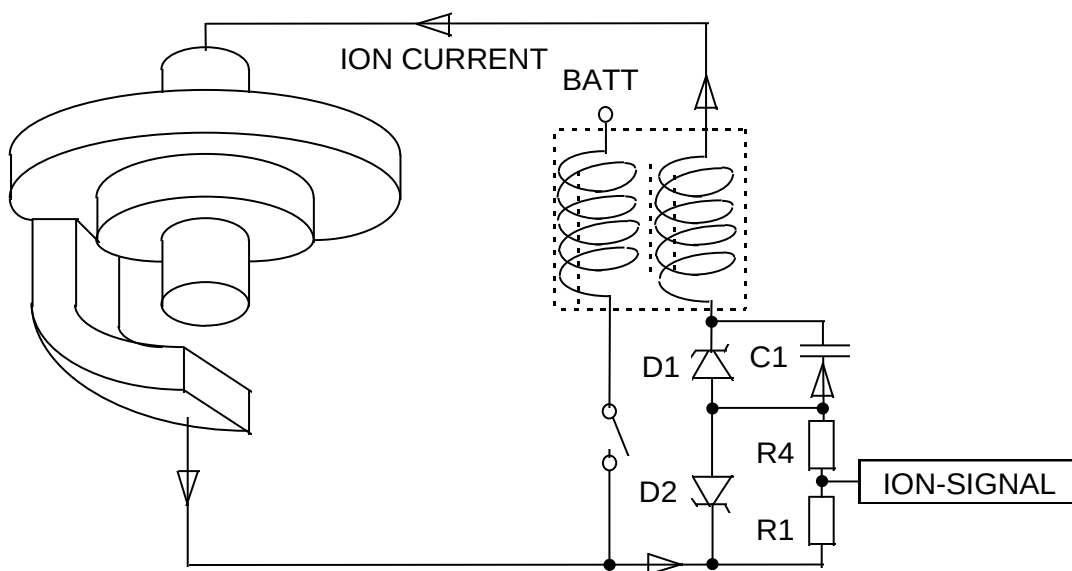


Figur 3. Medelvärdet av jonström från en bensindriven motor. Jonströmmen delas in i två faser: Den kemiska fasen [-255,-240] CAD och den termiska fasen [-250,-200] CAD.

Förbränningsgasen innehåller alltså laddade partiklar och koncentrationen av laddade partiklar beror utav den kemiska reaktionen (oxidationen) och sedan på hur tryck och temperatur byggs upp i cylindern. Koncentrationen av laddade partiklar gör att gasen blir konduktiv (får förmåga att leda ström) och ju högre koncentrationen är av laddade partiklar desto högre blir konduktiviteten. Om man applicerar en spänning över tändstiftet så kommer det att flyta en ström över tändstiftet, och strömmens storlek är direkt proportionell mot koncentrationen av laddade partiklar. Om man kan mäta koncentrationen av laddade partiklar kan man få information om förbränningen i cylindrarna, cykel för cykel.

Ett sätt att mäta koncentrationen av laddade partiklar är att mäta strömmen över tändstiftet. Fig. 4 visar en principskiss över ett induktivt tändsystem med jonströmsmätning. Jonströmmen mäts via tändstiftet och tändspolens sekundärlindning. Denna mätning av strömmen kräver endast enkel elektronik bestående av passiva standardkomponenter.

Då man mäter jonström på detta vis fås en *lokal* mätning av koncentrationen av laddade partiklar runt tändstiftet. Då förbränningsgaserna virvlar runt i cylindrarna ger detta upphov till att jonströmmen fluktuerar stokastiskt beroende på att förbränningsgasen inte är homogen.



Figur 4. Principskiss över ett induktivt tändsystem med jonströmsmätning. Jonströmmen mäts via tändstiftet och tändspolens sekundärlindning. Elektroniken för att mäta består av passiva standardkomponenter.

3 PROJEKTETS GENOMFÖRANDE

Projektet var experimentellt i sin karaktär. Genom att mäta jonström och tryck samt emissioner syftade projektet till att undersöka vilka samband som finns mellan jonström och de förbränningsparametrar som är av intresse för att kunna styra en naturgasdriven motor så att verkningsgraden höjs och emissionerna minskar. Projektet skulle använda sig av den omfattande erfarenheten från jonströmsteknik som tidigare applicerats på bensindrivna bilmotorer.

Projektet var ursprungligen planerat att innefatta anpassning och utveckling av jonströmsalgoritmer samt mätning och utvärdering av informationsinnehållet i jonström från tre olika industriella gasmotorer med förkammare och som körs i magerdrift. Projektet har genomförts enligt plan med undantag att två av de tre mätningarna inte har kunnat genomföras eftersom berörda OEM inte kunde frigöra sina motorer för mätning. Hos en OEM genomförde projektet med framgång en mätning och omfattande analys av insamlat data. Mätningarna genomfördes på plats hos kunden på en stationär industriell gasmotor med förkammare.

I syfte att testa applicerbarheten utav flerdimensionella statistiska signalbehandlingsmetoder vid analys av jonström från en naturgasdriven motor genomfördes mätningar på en naturgasdriven motor för tunga fordon i Lund Tekniska högskola. Denna motor körs med stökiometrisk bränsleblandning och antändningen sker med ett vanligt tändstift utan förkammare. Härvid liknar jonströmmen den som uppkommer i en bensindriven bilmotor. Studien var fokuserad på verifiering av den statistiska signalbehandlingsmetodens prestanda där flera indikatorer används samtidigt och viktas samman i en klassificeringsstrategi vid skattning av luft till bränsle förhållandet. En jämförelse gjordes med traditionella metoder då endast en jonströmsindikator används få att få fram önskad information.

4 ANALYS AV MÄTDATA

4.1 INDUSTRIELL GASMOTOR MED FÖRKAMMARE

Mätdata samlades från en industriell gasmotor med förkammare som kördes med konstant varvtal vid olika last, AFR och tändvinkel:

- Lasten på motorn varierades mellan låg (25%) och hög (75-100%)
- AFR varierades både i för- och huvudkammaren med konstant tändvinkel
- Tändvinkeln varierades med konstant AFR.

Målet med denna studie var att undersöka i vilken omfattning man kan utvinna information från förbränningsprocessen genom jonströmsteknik, speciellt i syfte att:

- 1) Optimera förbränningsstabiliteten i huvudkammaren genom att mäta jonström i förkammaren.
- 2) Detektera knack och misständning
- 3) Skatta värden på
 - a) Förbränningsstabilitet
 - b) Position (CAD) för tryckmax.

Jonströmmen mättes vid två positioner:

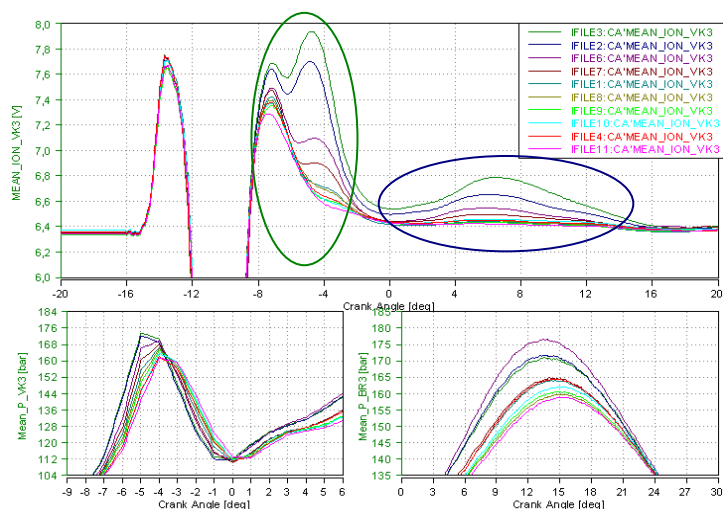
- a) Via tändstiftet som finns monterat inuti håligheten i förkammaren. Notera att mätsensorn (tändstiftet) därmed är ”skyddad” från huvudkammaren. Eftersom bränsleblandningen är relativt fet i förkammaren är signalstyrkan från förbränningen i förkammaren god.
- b) Via en sensor i huvudkammaren. Eftersom bränsleblandningen är relativt mager i huvudkammaren är signalstyrkan från förbränningen i huvudkammaren svag.

Studien visade att:

1. Jonströmmen som mättes i huvudkammaren var för svag för att kunna användas till förbränningsanalys.
2. Jonström från förkammaren ger information om:
 - a. Förbränningen i huvudkammaren
 - i. Position för tryckmax
 - ii. AFR i huvudkammaren
 - iii. Knack, fast en cykel efter knacket
 - b. Misständning i förkammaren
3. Förbränningsstabiliteten i huvudkammaren är starkt korrelerad med förbränningen i förkammaren. Jonströmsmätning i förkammaren kan användas för att optimera bränsletillförseln i förkammaren så att förbränningsstabiliteten i huvudkammaren blir optimal. Härigenom minimeras emissionerna från motorn.

4.1.1 Generella observationer

Jonströmmen i förkammaren bär information om förbränningen i huvudkammaren vilket framgår från Fig. 5 som visar medelvärdet av 200 förbränningscykler för 10 olika driftspunkter där AFR i förkammaren har varierats från fet till mager (fetast mörk grön och magrast rosa)



Green circle - PCC ion current
Blue circle - MCC combustion visible in PCC ion current through reflection.

Left - PCC pressure
Right - MCC pressure

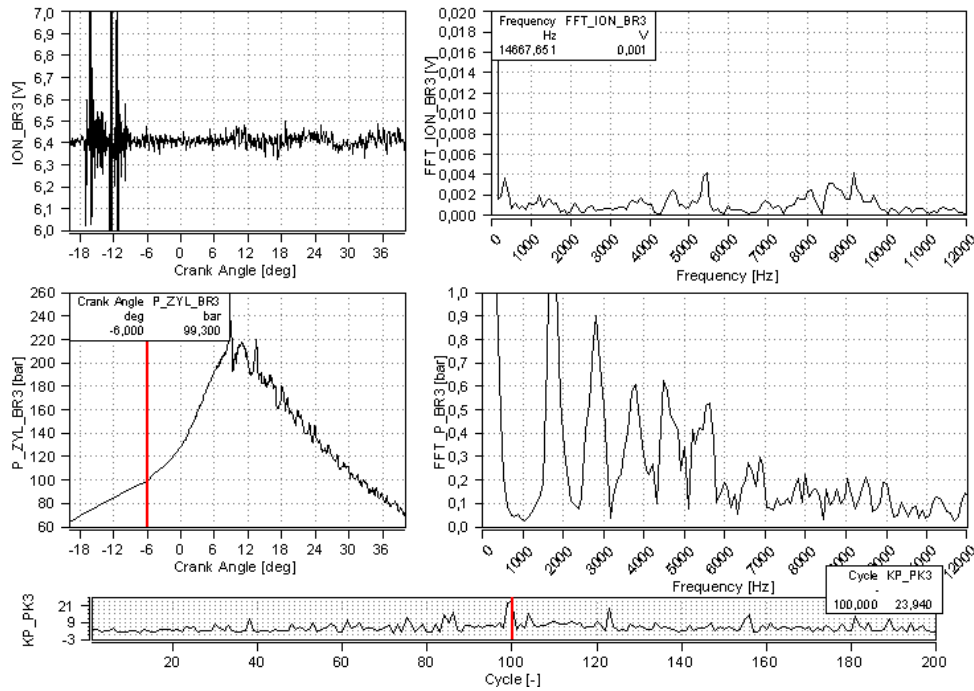
Figur 5. Medelvärdet av 200 förbränningscykler för 10 olika driftspunkter: Varierande AFR i förkammaren (fetast mörk grön och magrast rosa). PCC = förkammare, MCC = huvudkammare.

Man kan tydligt se från figuren att ökningen i jonström i intervallet runt 10 CAD korrelerar väl med tryckhöjningen i huvudkammaren. Trycket i huvudkammaren ger upphov till en jonström i förkammaren.

4.1.2 Knack

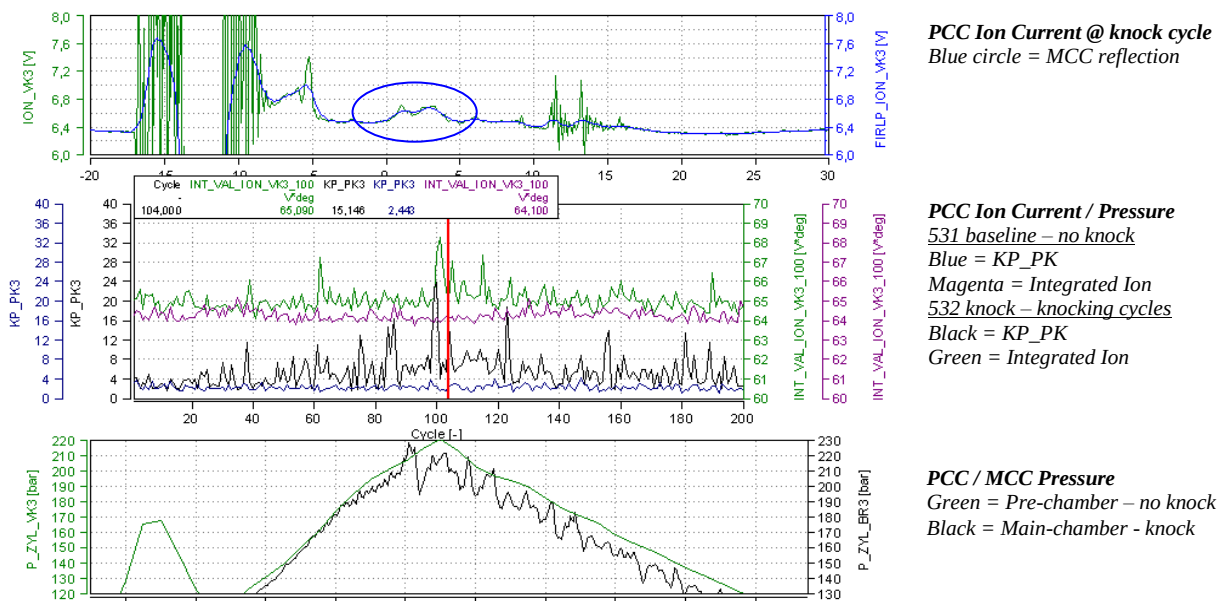
När man använder trycksensorer kan man se knack som en superponerad högfrekvent signal, en ”ringning” som beror av att stående tryckvågor oscillerar i cylindern. Eftersom jonström är starkt korrelerat med trycket i cylindern uppstår en liknande ringning i jonströmsignalen.

I motorer som körs med stökiometrisk bränsleblandningar är jonströmsignalen stark och kan med framgång användas för att detektera knack. I magermotorer är emellertid jonströmsignalen i huvudkammaren så svag att det inte går, vilket illustreras av Fig. 6 som visar jonströmmen och trycksignalen i huvudkammaren. Det framgår tydligt att jonströmsignalen är svag och att knacket inte kan observeras vare sig i tids- eller frekvensdomänen. Det är den magera bränsleblandningen som gör att jonströmsignalen är svag. I trycksignalen ser man emellertid tydligt att det är en knackande förbränningscykel, både i tids- och frekvensdomänen.

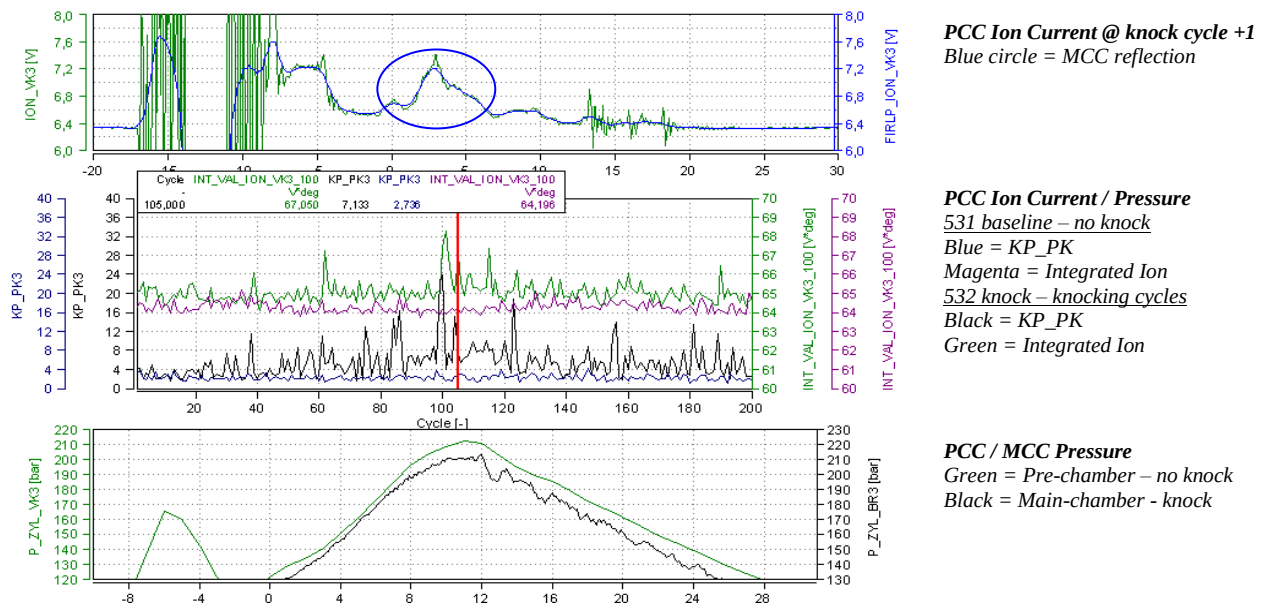


Figur 6. Övre vänster: Jonström i huvudkammaren.
 Övre höger: Spektralanalys (FFT) av jonströmmen i huvudkammaren
 Nedre vänster: Trycksignal från huvudkammaren
 Nedre höger: Spektralanalys (FFT) av trycksignalen i huvudkammaren.

Eftersom jonströmmen i huvudkammaren var så svag användes istället jonströmmen i förkammaren. Tidigare studier har visat att signalnivån i jonströmmen har en tendens att öka drastiskt i förbränningscykeln efter knock. Som illustration av detta fenomen, se Fig. 7 och Fig. 8 som visar tryck och jonström vid knockande respektive icke knockande cykler.



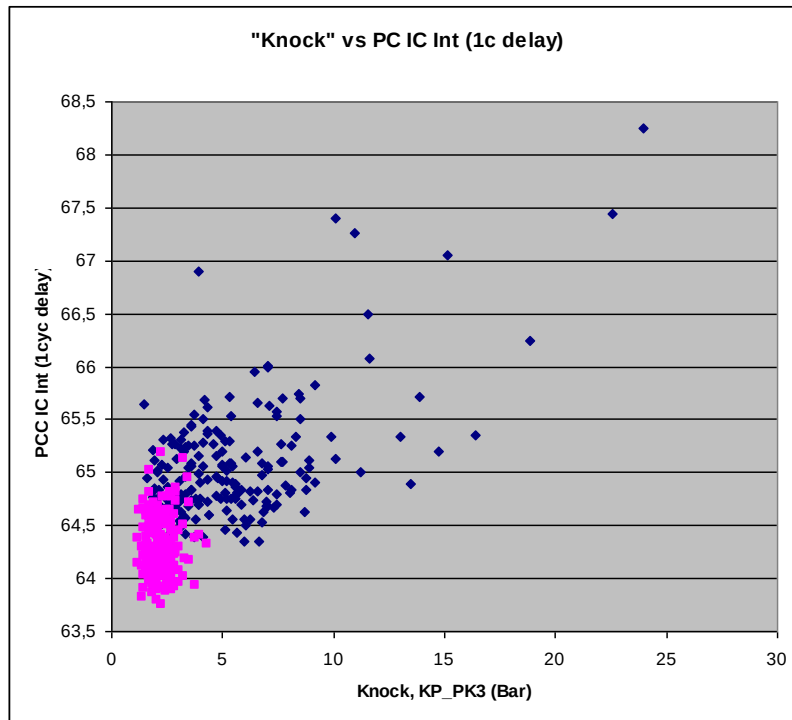
Figur 7. Signaler vid knockande förbränningscykel.



Figur 8. Signaler vid cykel efter knock.

Jonströmsignalen är signifikant högre efter en knackande cykel än under själva knacket. Det finns olika teorier om orsaken till detta. En förklaring kan vara att temperaturen i cylindern är väsentligt högre i cykeln efter knock som en följd av knacket.

Genom att plotta en s.k. ”scatter plot” med ett tryckbaserat mått på knock (KP_PK) på x-axeln och ytan under jonströmmen cykeln efter knock på y-axeln bekräftas att knock kan detekteras via jonströmsmätning i förkammaren, se Fig. 9.



Figur 9. Tryckbaserat mått på knock (KP_PK) på x-axeln och ytan under jonströmmen i förkammaren på y-axeln. Magenta är referensdata utan knock och blå är knockande cykler.

Från dessa observationer kan man dra slutsatsen att det finns en koppling mellan jonströmmen i förkammaren och förbränningen i föregående cykel.

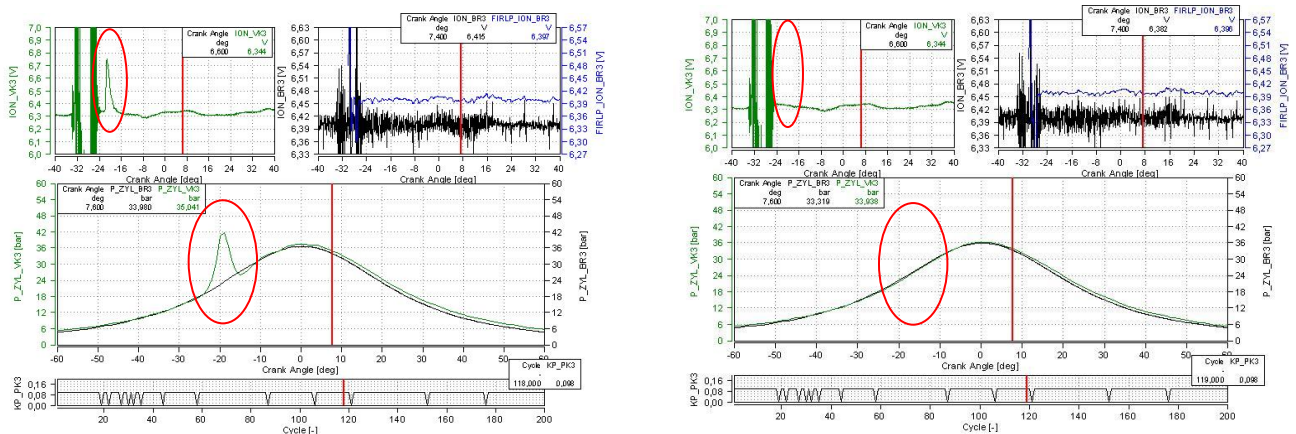
4.1.3 Misständning

Med misständning menas i denna rapport en förbränningscykel där endast en del eller inget bränsle har brunnit. Syftet med denna analys var att undersöka ifall man genom jonströmsmätning i förkammaren kan detektera misständning.

Jonström uppstår vid förbränning av bränsle och av konsekvensen därav, nämligen högt tryck och temperatur. Genom att beräkna integralen av jonströmssignalen över förbränningscykeln kan man alltså få ett mått på förbränningsintensiteten. På samma sätt kan man mäta effekten av en förbränning via tryckmätare. Ifall ingen förbränning sker får man inte något bidrag till trycket från förbränningen. Trycksignalerna är att betrakta som referens. Genom att mäta jonström i förkammaren och tryck i för- respektive huvudkammare kan man få fram korrelationer mellan dessa vilka ger en uppfattning av informationsinnehållet i jonströmssignalen.

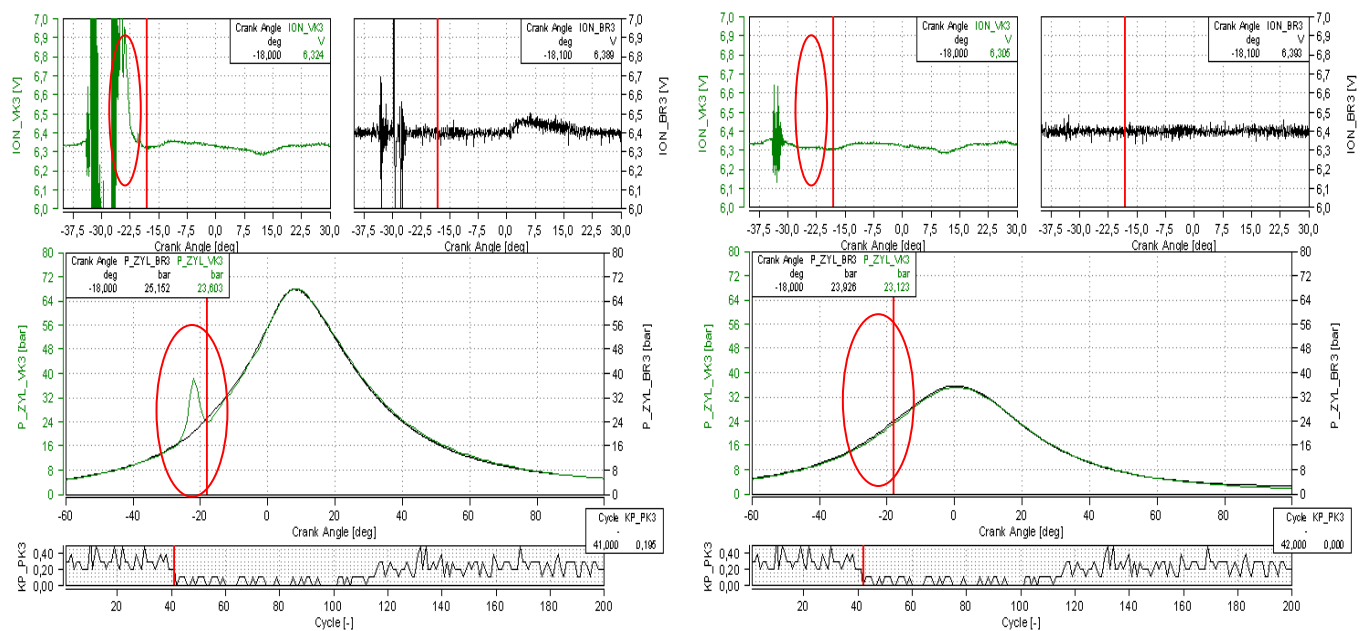
Experiment genomfördes genom att köra motorn på 10 % last, varvid bränsleblandningen i en cylinders förkammare successivt gjordes magrare. Då bränsleblandningen i förkammaren är mager blir antändningen av bränslet i huvudkammaren och vid en tillräckligt mager blandning får man misständning i huvudkammaren då och då, även då bränslet i förkammaren faktiskt brinner. För tillräckligt magra blandningar i förkammaren får man misständning även i förkammaren och följaktligen också i huvudkammaren. Fig. 10 i vänstra nedre grafen visar trycksignalen i för- och huvudkammare från en förbränning med god förbränning i förkammaren, se markerade området i tryckspåret. Förbränningen i förkammaren ger upphov till en lokal tryckökning i förkammaren som förviner då förbränningsgaserna trycks ut i

huvudkammaren. Vänstra övre grafer visar jonströmsignalen i förkammare respektive huvudkammare. I jonströmmen från förkammaren kan man tydligt se en ökad jonström under förbränningen. Jonströmmen från huvudkammaren ger inte samma tydliga information. Högra graferna visar likadana grafer, fast från en förbränningscykel med misständning – det finns ingen jonström- och trycksignal i förkammaren.



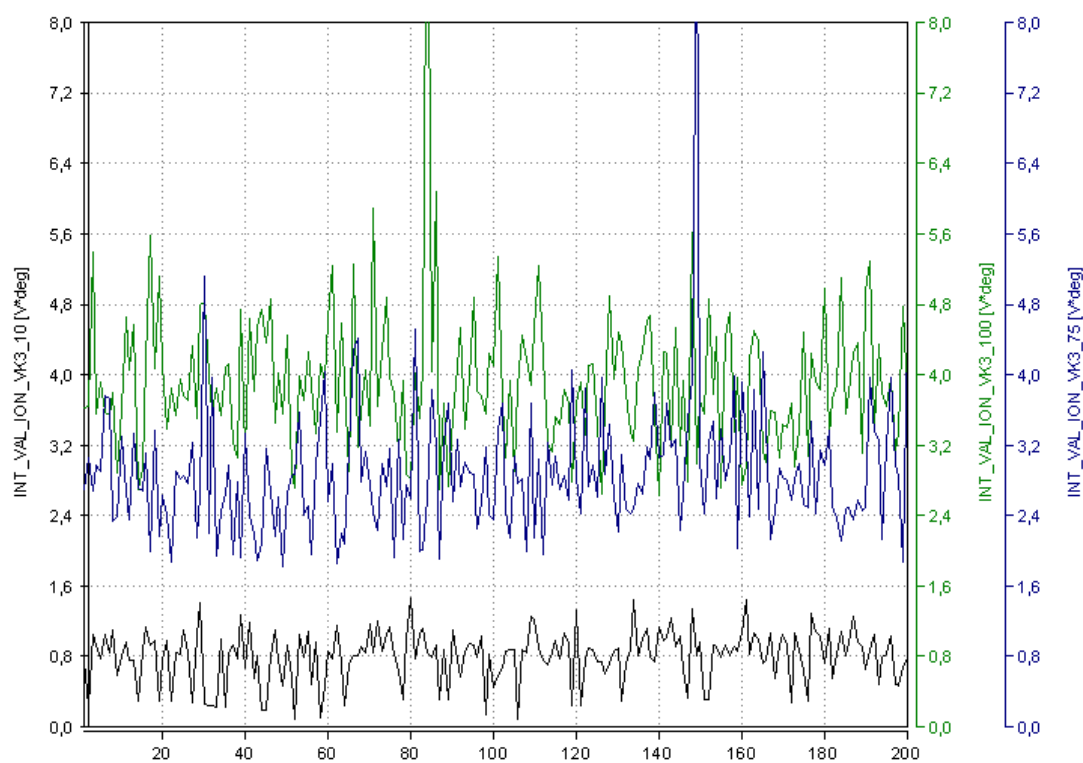
Figur 10. Vänstra nedre plotten visar trycksignalen i för- och huvud-kammare från en förbränning med god förbränning i förkammaren, se markerade området i tryckspåret. Förbränningen i förkammaren ger upphov till en lokal tryckökning i förkammaren som förviner då förbränningsgaserna trycks ut i huvudkammaren. Vänstra övre plottar visar jonströmsignalen i förkammare resp. huvudkammare. I jonströmmen från förkammaren kan man tydligt se en ökad jonström under förbränningen. Jonströmmen från huvudkammaren ger inte samma tydliga information. Högra plottarna visar likadana grafer, fast från en förbränningscykel med misständning.

Ett annat sätt att åstadkomma misständning är att inte generera gnista, se Fig. 11. Även i dessa referensplottar kan man se en tydlig korrelation mellan jonström och trycket i förkammaren.



Figur 11. Vänster: Normal förbränning. Höger: "Misständning" genom att inte någon gnista har skjutits.

Jonströmsintegralen från förkammaren registrerades vid 100 %, 75 % och 10 % motorlast, se Fig. 12. Notera att det är olika jonströmsnivåer vid olika motorlast, vilket beror på att joniseringsnivån ökar med last (bränslemängd). En misständning i förkammaren skulle ge en jonströmsintegral nära noll vilken lätt kan detekteras, speciellt tydligt vid högre laster.



Figur 12. Jonströmsintegralen i förkammaren vid tre olika motorlaster: 100 % (grön), 75 % (blå) och 10 % (svart). Vid misständning blir jonströmsintegralen liten och syns som en

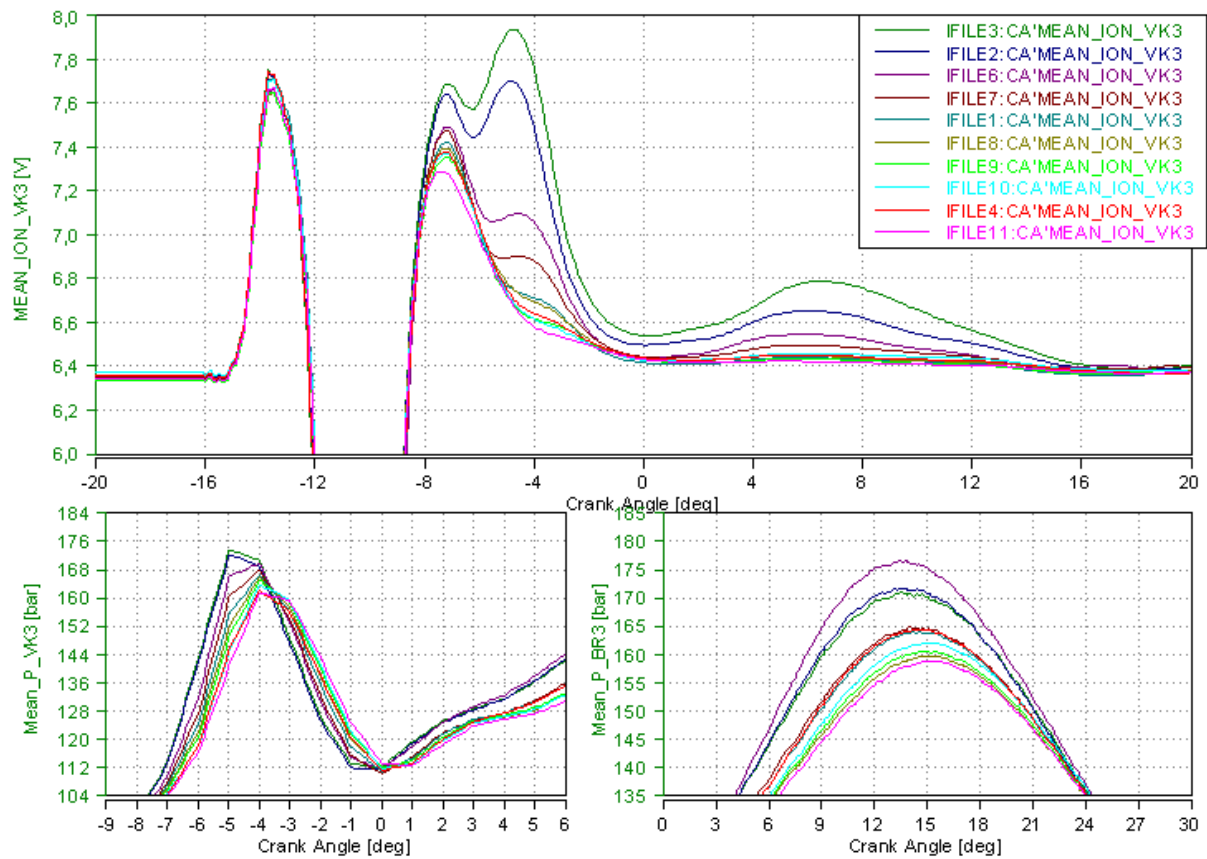
”negativ spik” vilket syns vid drift med 10 % last. Vid högre laster finns inga misständningar i dessa data. Notera att det är olika jonströmsnivåer vilket beror på att joniseringsnivån ökar med motorlast. En misständning i förkammaren ger en jonströmsintegral nära noll vilken lätt kan detekteras.

Man kan dra slutsatsen att det går bra att detektera misständning i förkammaren från jonströmsmätning.

4.1.4. Optimering av förbränningsstabilitet

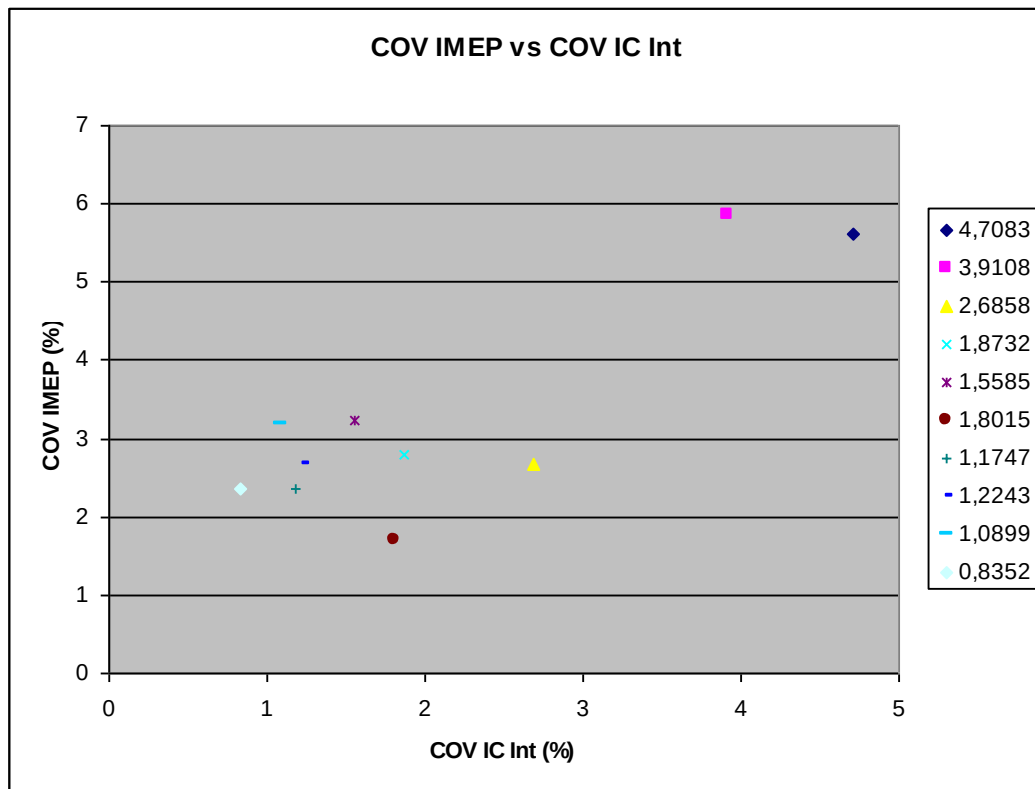
I en motor med förkammare är det förkammaren som antänder bränslet i huvudkammaren. Avgörande för förbränningsstabiliteten från cykel till cykel i huvudkammaren är därför att förbränningen i förkammaren är stabil. Variationer i förkammarens förbränning leder oundvikligen till variationer i huvudkammaren. Genom att minimera variationerna i förkammarens förbränning kan de variationer i huvudkammaren som beror på antändningen minimeras. Studien visade att detta kan åstadkommas med hjälp av jonströmsmätning i förkammaren.

Experiment genomfördes för att klarlägga samband mellan ett antal faktorer som påverkar förbränningen i förkammaren och dess påverkan på förbränningen i huvudkammaren. I Fig. 13 visas sambandet mellan jonström i förkammaren och tryck i för- och huvudkammare vid olika AFR. Det finns ett tydligt samband. Då mer bränsle tillförs förkammaren (fetare blandningar) ökar jonströmmen och maxintensiteten kommer något tidigare. Från tryckmätningen ser man att trycket i förkammaren ökar med tillförd bränslemängd och CAD för maximum blir tidigare. Som förväntat avspeglas detta i tryckmätning i huvudkammaren där CAD för tryckmax även den kommer tidigare. Notera att plottarna visar medelvärdet, vilket inte ger någon information om cykel till cykel variationerna (COV).



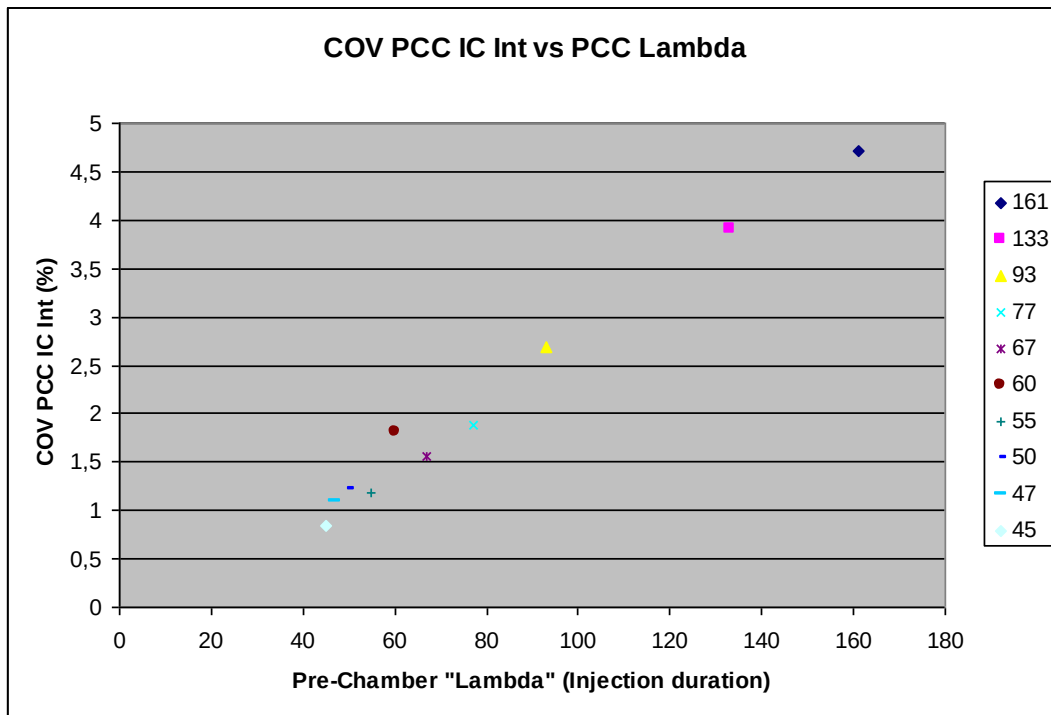
Figur 13. Övre: Medelvärde av jonström i förkammaren för varierande AFR.
 Nedre vänster: Tryckmätning i förkammaren kring CAD för antändning.
 Nedre höger: Tryckmätning i huvudkammaren vid CAD kring tryckmax.

Variationer i förkammarens förbränning leder till variationer i huvudkammaren, vilket sänker motorn verkningsgrad och ökar emissionerna. Fig. 14 visar variationen (COV) av jonströmsintegralen vs variationen av IMEP (effektivt tryck i huvudkammaren). Från Fig. 14 kan man dra slutsatsen att varians i IMEP ökar med varians i förkammarens jonström.



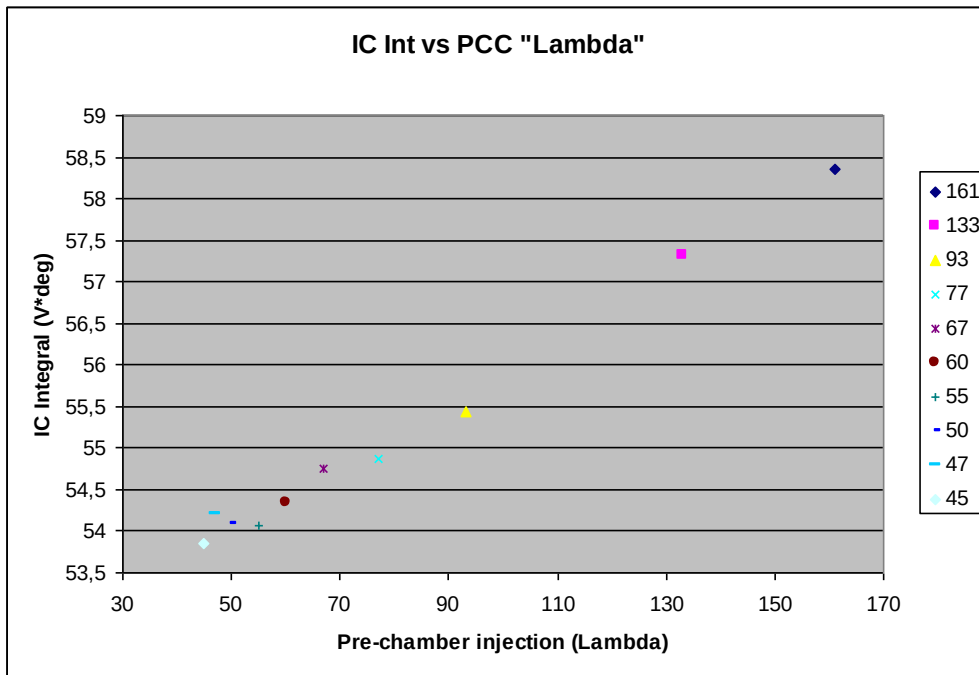
Figur 14. Variansen (COV) av jonströmsintegralen som funktion av variansen av IMEP (effektivt tryck i huvudkammaren).

Varians i integral av jonström i förkammaren beror av bränsletillförseln i förkammaren. Fig. 15 visar att variansen ökar med ökad bränsletillförsel.



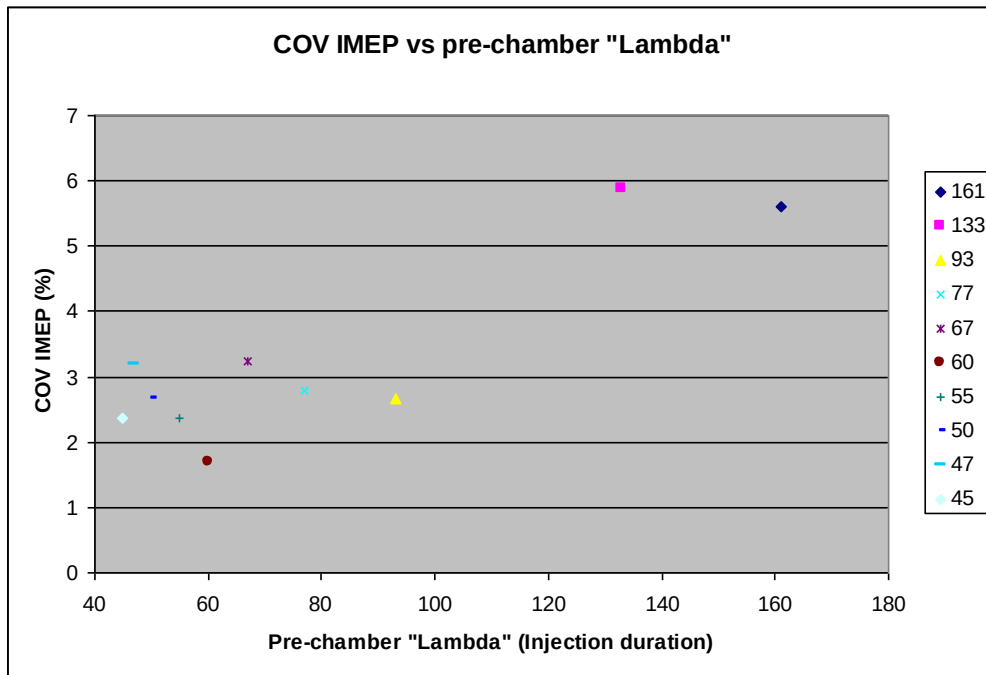
Figur 15. Variansen (COV) i integral av jonström i förkammaren som funktion av bränsletillförsel i förkammaren. Ju mer bränsle som tillförs desto högre varians.

Det är emellertid svårt att veta hur mycket bränsle som tillförs förkammaren i praktiken. Gasinjektorerna till olika cylindrar skiljer sig beroende på t.ex. produktionstoleranser och förslitning samt olika tryckförhållanden vid injektorn. Experimentens resultat visar att bränsletillförseln i förkammaren kan övervakas via jonströmsmätning. Fig 16 visar att det finns ett tydligt samband och jonströmsintegralen förefaller öka linjärt med bränsletillförseln.



Figur 16. Integralen av jonströmen i förkammaren som funktion av bränsletillförsel. Det finns ett tydligt samband och jonströmsintegralen förefaller öka linjärt med bränsletillförsel.

Från resultaten ovan kan man dra slutsatsen att COV_{IMEP} beror av tillförseln av gas i förkammaren och att detta kan övervakas och styras med hjälp av jonströmsmätning i förkammaren. Denna slutsats bekräftas av Fig. 17 som visar COV_{IMEP} som funktion av bränsletillförsel i förkammaren. COV_{IMEP} ökar med ökad bränsletillförsel. Det finns ett AFR i förkammaren som minimerar COV_{IMEP} i huvudkammaren, vilket inte syns i data från detta experiment. Om bränsletillförseln i förkammaren hade minskats hade denna punkt nåtts och vid ytterligare sänkning hade COV_{IMEP} ökat.



Figur 17. COV_{IMEP} som funktion av bränsletillförsel i förkammaren.

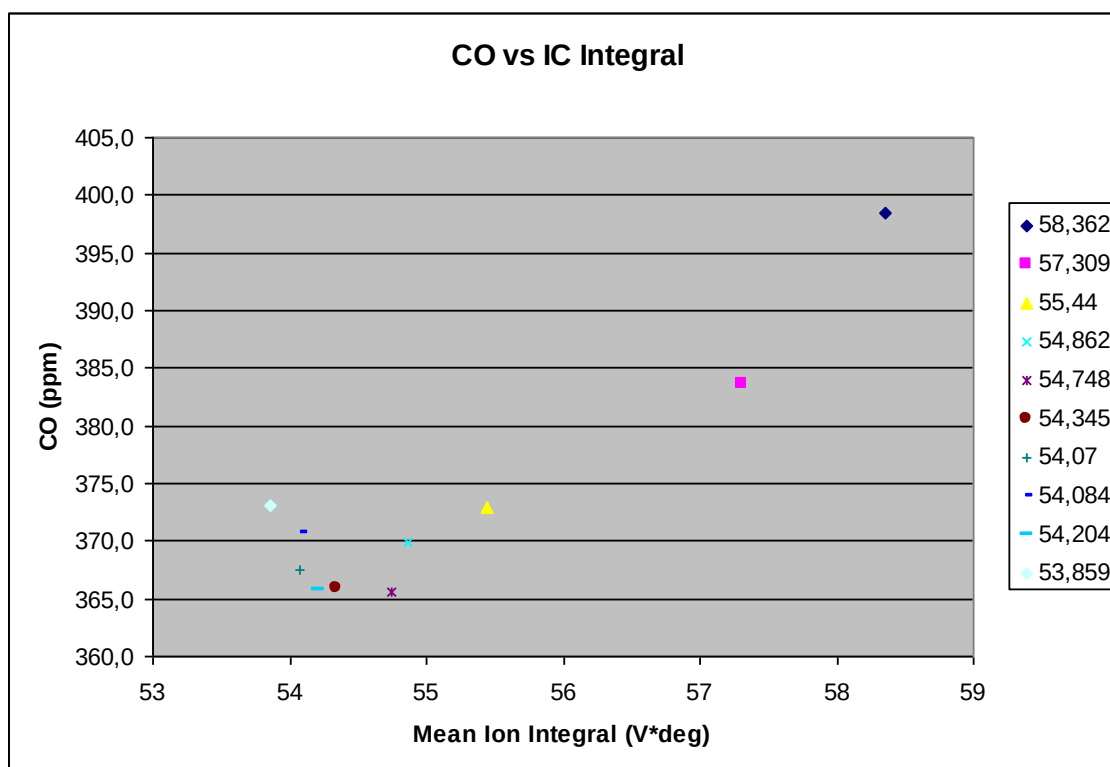
Experimenten visar att förbränningsstabiliteten i huvudkammaren kan optimeras via bränsletillförseln i förkammaren, vilken kan övervakas och styras genom mätning av jonström i förkammaren. Men vilken effekt har detta på emissionerna?

4.1.5 Minskade avgaser med jonströmsteknik

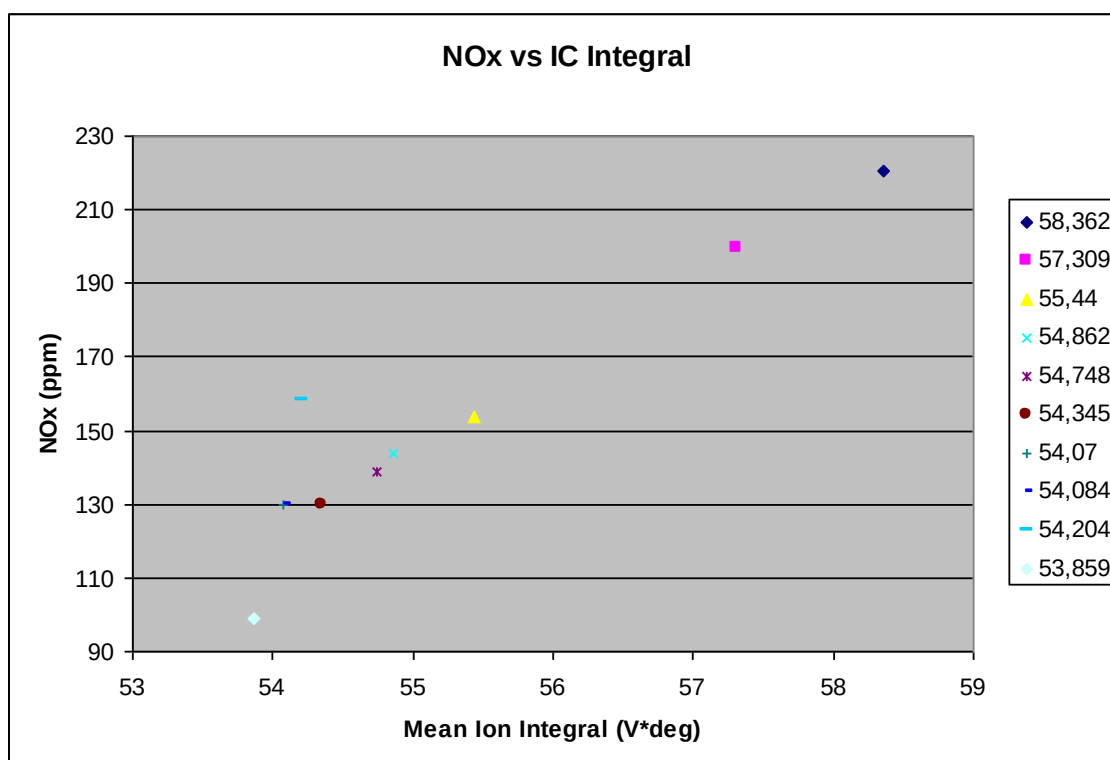
Miljöaspekterna ökar successivt i betydelse. Det är viktigt att förbränningen i motorerna sker under optimala förhållanden så att emissionerna blir minimala och verkningsgraden optimal. Nya lagar stiftas avseende kontroll av utsläppen utav koloxid (CO), kväveoxider (NO_x) och kolväten (HC). Emissionerna från en motor är starkt korrelerad med COV_{IMEP} . Genom att använda observationerna från jonströmsmätningarna som visar samband mellan COV_{IMEP} och jonström kan man reducera avgaserna från gasmotorer som körs i magerdrift och som använder förkammare. Man kan förvänta sig att jonström är en god indikator på emissioner från motorer. Denna hypotes bekräftas av Fig. 18 – Fig. 20, från vilka följande slutsatser kan dras:

- Utsläpp av CO ökar med ökad mängd bränsle i förkammaren
- Utsläpp av NO_x ökar med ökad mängd bränsle i förkammaren
- Utsläpp av HC verkar inte påverkas i någon större omfattning av mängden bränsle i förkammaren

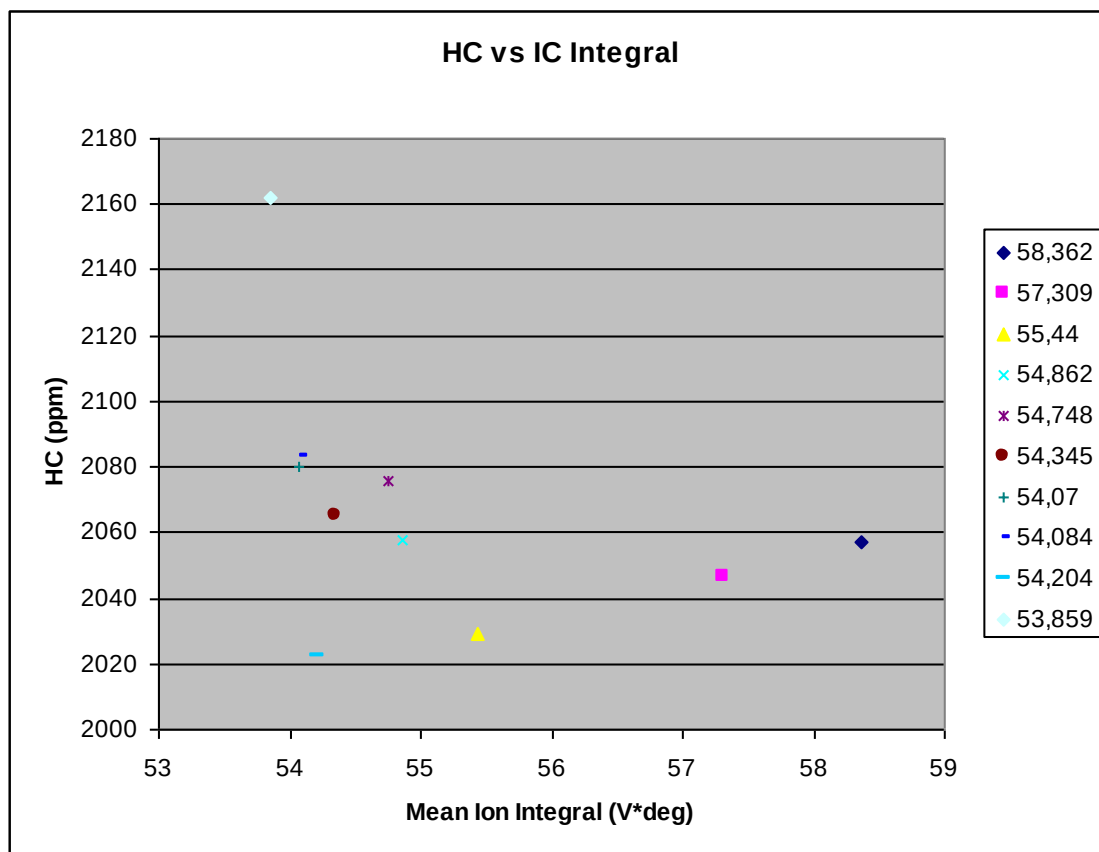
Data innehåller tyvärr inte mätningar med mindre bränsle i förkammaren. Arbetet att sammanställa resultaten från experimentet genomfördes efter att mätningarna genomförts vilket förklarar varför.



Figur 18. CO som funktion utav integralen av jonström i förkammaren.



Figur 19. NO_x som funktion utav integralen av jonström i förkammaren.

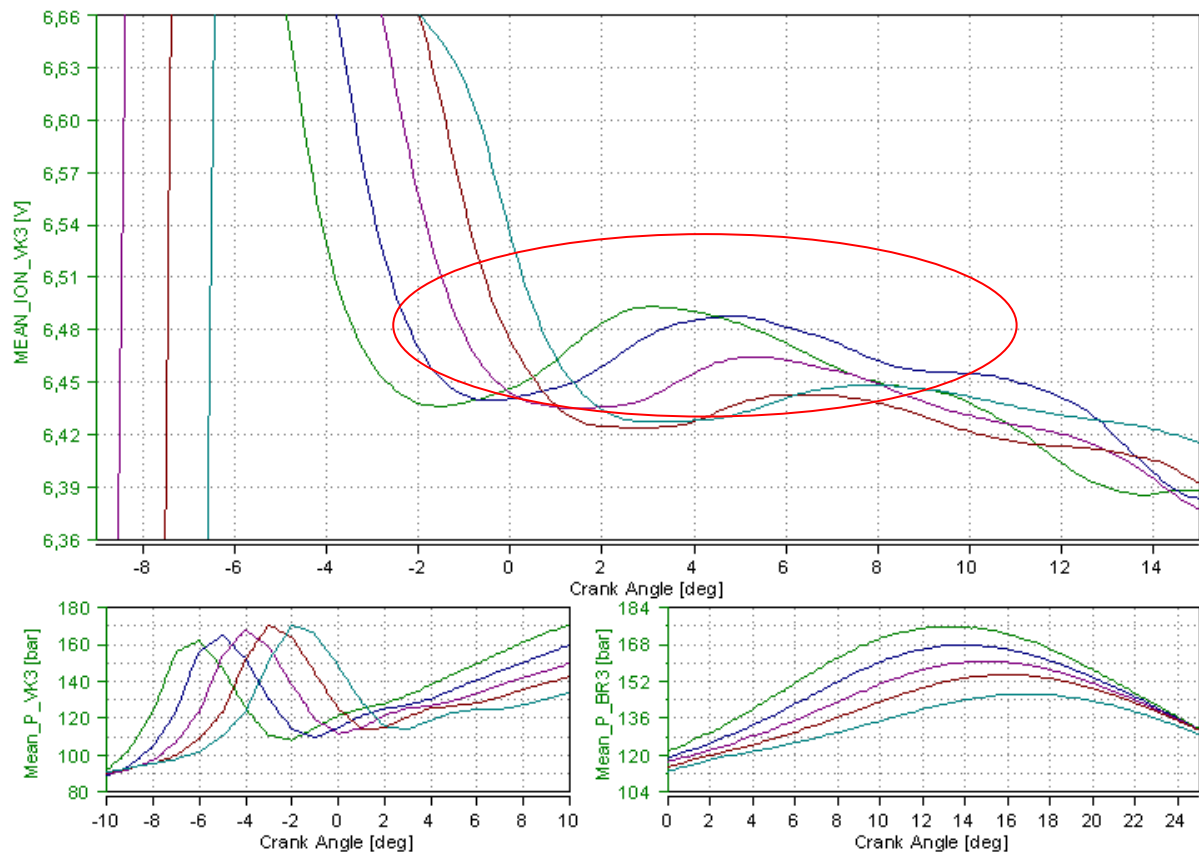


Figur 20. HC som funktion utav integralen av jonström i förkammaren

Från resonemanget ovan kan man dra slutsatsen att jonström i förkammaren är en god indikator på emissionerna.

4.1.6 Tryckmax i huvudkammaren

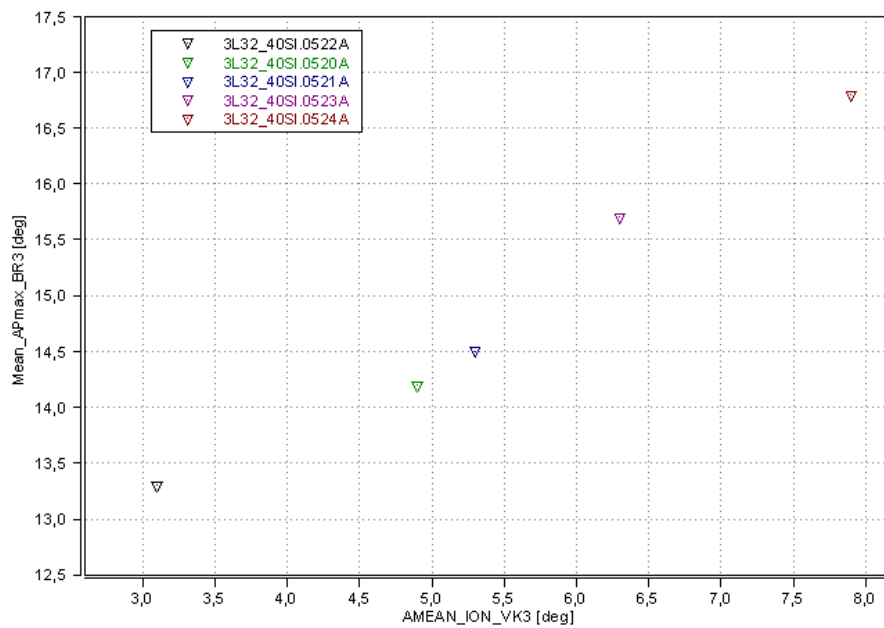
En motors verkningsgrad är direkt kopplad till förbränningsfasen, d v s när förbränningen sker relativt kolvarnas läge (CAD). Ett mått på förbränningsfas är tryckmax i huvudkammaren. I syfte att utvärdera om jonströmsmätning i förkammaren kan användas för att skatta tryckmax i huvudkammaren genomfördes en serie mätningar där tändvinkeln (CAD för tändning) varierades. Motorn kördes med 100 % last och tändvinkeln varierades från -2 till +2 CAD kring kalibrerad tändvinkel i steg om 1 CAD, se Fig. 21.



Figur 21. Medelvärde av jonströmmen i förkammaren vid varierande tändvinkel [-2, -1, 0, 1, 2] CAD från kalibrerad tändvinkel. Övre: Jonström i förkammaren. Nedre vänster: Tryck i förkammaren. Nedre höger: Tryck i huvudkammaren.

Som tidigare nämnts kan man observera en puckel i jonströmmen i förkammaren som kommer utav trycket som byggs upp i huvudkammaren, vilket markerats med den röda cirkeln i Fig. 21. Av Fig. 21 ser man att jonströmmen i förkammaren och trycket i för- och huvudkammare som väntat påverkas av tändvinkeln. Kan man få information om tryckmax i huvudkammaren genom mätning av jonström i förkammaren?

I Fig. 22 visas sambandet mellan tryckmax i huvudkammaren och jonström i förkammaren. Det finns ett tydligt samband som verkar vara linjärt.



522A: IT2 adv
 520A: IT1 adv
 521A: IT0
 523A: IT1ret
 524A IT2 ret

Figur 22. X-axel: Position av max i jonströmmen (CAD) i förkammaren som kommer från trycket i huvudkammaren (inringade rött i Fig. 21).
 Y-axeln: Position på tryckmax i huvudkammaren (CAD).

Vi kan dra slutsatsen att jonströmsmätningar i förkammaren kan användas som indikator på tryckmax i huvudkammaren.

4.2 GASMOTOR TILL TUNGA FORDON

Vid Lunds Tekniska Högskola (LTH) finns en naturgasdriven lastbilmotor utrustad med jonströmsmätning, se Fig. 23. Projektet genomförde mätningar på denna motor i syfte att utvärdera en ny metod för skattning av AFR i cylindrarna som baseras på en statistisk ansats. Denna motor är inte utrustad med förkammare och körs med nära stökiometrisk luft-bränsleblandning.



Figur 23. Tung naturgasdriven lastbilsmotor i Lunds Tekniska Högskola.

4.2.1 Bakgrund

I motorer med katalysator är det mycket viktigt att motorn körs under stökiometriska förhållanden i alla cylindrar, d v s $\lambda=1$. Det finns lambda sensorer som mäter AFR. De sitter monterade nedströms och i serietillverkning efter att avgaserna från en grupp cylindrar har sammanförts. Lambda sensorer mäter genomsnittet av AFR såtillvida inte högupplösande och snabba lambda sensorer används i kombination med databearbetning som håller reda på när avgaser från de enskilda cylindrarna passerar sensorn, vilket är en utmaning vid varierande last och varvtal. Om ett genomsnitt av AFR i cylindrarna mäts kan några cylindrar köras magert och några fett, utan att det detekteras. Detta ger ökade emissioner och minskad verkningsgrad. Det är viktigt att cylindrarna i en motor är balanserade med avseende på AFR.

Genom åren har många ansatser för att skatta AFR i cylindrarna under motordrift m h a jonströmsanalys genomförts. Det har emellertid visat sig svårt eftersom jonströmmen påverkas av en mängd faktorer som gör att estimaten inte är tillräckligt robusta för att användas i kommersiell drift. En mängd informationsbärare i jonströmssignalen har använts, som t.ex. derivatan i den kemiska fasen, maxpositionen mm. Ofta har bara en enda informationsbärare använts som indikator, men genom att använda flera indikatorer samtidigt och vikta ihop dessa på ett optimalt sätt finns en potential att göra estimaten av AFR i cylindrarna både mer robusta och noggranna.

4.2.2 Statistisk signalbehandlingsansats

I jonströmmen finns många indikatorer som av erfarenhet korrelerar med AFR. Exempel på sådana är:

1) Kemiska fasen i jonströmmen

- a) Areal
- b) Maxvärdet i kemiska fasen
- c) CAD för maxvärdet i kemiska fasen
- d) Derivatet i upp- eller nedflank av den kemiska fasen

2) Termiska fasen

- a) Areal
- b) Maxvärdet i termiska fasen
- c) CAD för maxvärdet i termiska fasen
- d) Masscentrum i termiska fasen (CAD, lika integral på bägge sidor)
- e) Derivatet i nedflank från maxpunkten av den termiska fasen

Genom att mäta flera indikatorer på AFR samtidigt och vikta ihop dessa med hjälp av statistiska metoder torde slutresultatet bli bättre än om man bara använder en av indikatorerna. Två frågor uppstår då:

1. Vilka indikatorer skall man använda?
2. Hur skall man vikta ihop indikatorerna?

I projektet analyserades vilka indikatorer som bar mest information sett ur ett statistiskt perspektiv och deras statistiska egenskaper undersöktes. Dessa indikatorer viktades sedan ihop under antagandet att de var normalfördelade. Detta antagande visade sig vara riktigt i de flesta motordriftspunkter men inte i alla. Under antagandet av normalfördelade indikatorer var det rätt fram att beräkna det s.k. mahalanobisavståndet som är ett statistiskt mått på avståndet mellan två datamängder. Genom att mäta jonströmmen då AFR var känt kan man skaffa referensdata signifikant för ett givet AFR. Under drift av motorn samlas data och mahalanobiavståndet till en uppsättning referensdata med kända AFR beräknas. Det mahalanobiavstånd som är minst förklarar observerat data bäst och används som skattning på AFR, d v s man klassificerar observerat data att komma från någon av de kända klasserna (AFR).

För ytterligare information om beräkning av mahalanobiavstånd och klassificering hänvisar författarna till den rika litteraturen i ämnet.

4.2.3 Experimentets genomförande

Motorn kördes i olika driftspunkter med olika AFR, varvtal och last. Jonströmmen uppmättes för 500 förbränningscykler. Ur dessa data beräknades jonströmindikatorernas medelvärde och varians samt korskovarians mellan indikatorerna varvid referensdata var skapat. Man har en ”statistisk signatur” av data. Notera att dessa ”signaturer” typiskt består av ett fåtal skalärer (medelvärde och kovariansmatris). Driftpunkterna varierades som följer:

- Relativ AFR¹: [0.90, 0.95, 1.00, 1.05, 1.10]

¹ Relativ AFR benämns också *lambdavärde* (λ) och är ett normerat värde på AFR med avseende på det stökiometrisk AFR-värdet:

- Varvtal: [800, 1100, 1300] RPM
- Last: [40, 60, 100] %

Sedan kördes motorn i samma last och varvtal som tidigare och jonströmmen uppmättes. Ur observerade jonströmmar beräknades mahalanobian avstånd till referensdatasignaturerna och det AFR som motsvarade det minsta mahalanobian avståndet användes som skattning av AFR – man gör en klassificering.

Eftersom jonströmmen är brusig användes ett löpande medelvärde av indikatorerna över ett antal förbränningscykler.

4.2.4 Resultat

Ansatsen att använda flera indikatorer och beräkna mahalanobian avstånd fungerar bra:

- Relativ AFR i cylindern kan skattas med en upplösning på 0.05 och med ett RMSE i storleksordningen 0.5-2.0 %

$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_N (x - \hat{x})^2}}{\frac{1}{N} \sum_N x} \cdot 100\%$$

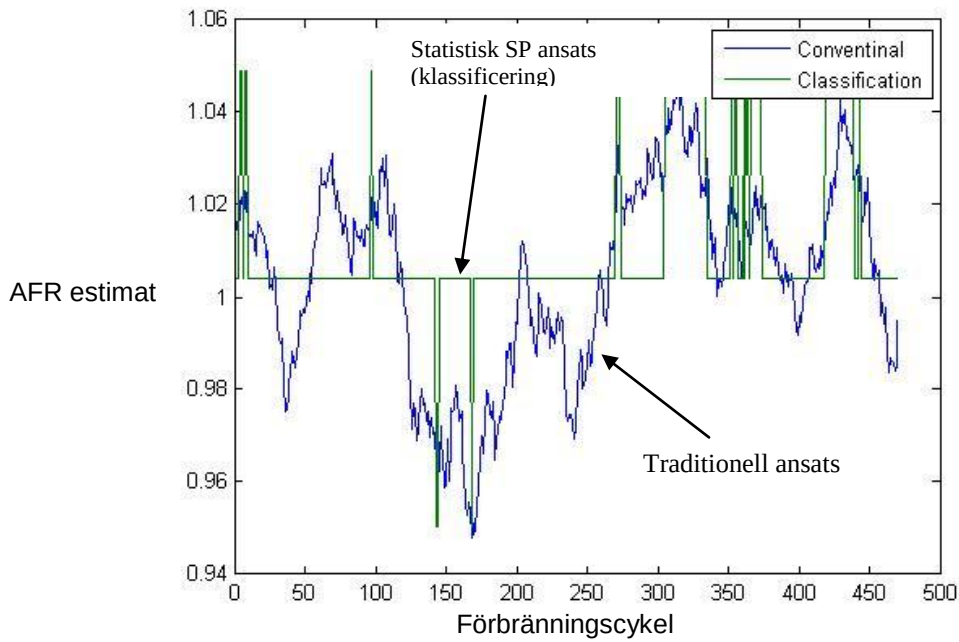
- Ansatsen är inte beräkningstung

Vid beräkningarna användes följande 6 jonströmindikatorer:

- Från kemiska fasen av jonströmmen:
 - Areal under jonströmmen (integralen)
 - Maxvärdet
 - Medelderivatan i ett intervall från maxvärdet och 5 CAD innan maxvärdet
- Från termiska fasen:
 - Areal
 - Maxvärdet
 - Medelderivatan i ett intervall från maxvärdet och 14 CAD efter maxvärdet

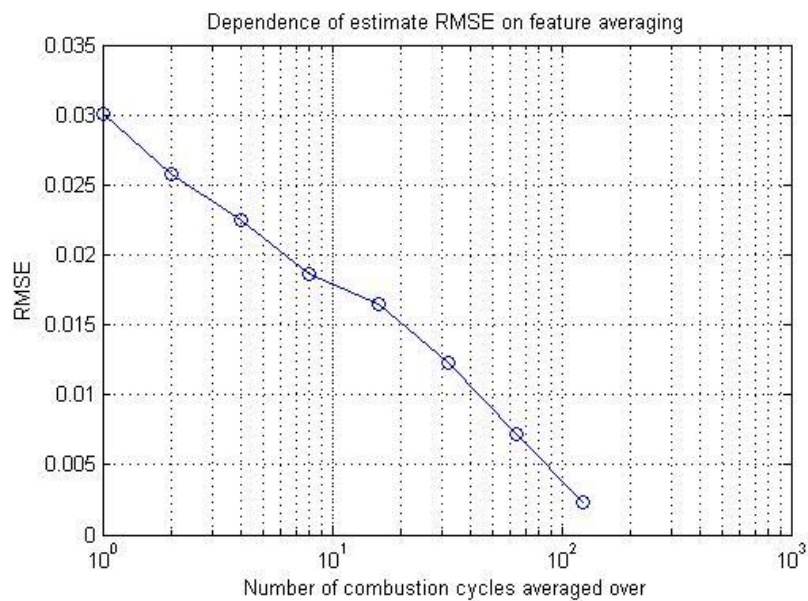
Fig. 24 visar estimat av relativ AFR cykel för cykel beräknat med en ”traditionell” ansats där man använt derivatan av jonströmmen i den kemiska fasen minsta kvadrat anpassning av rät linje till jonströmmen i ett intervall från maxvärdet och 5 CAD innan maxvärdet samt då man använt fler indikatorer enligt ovan. Prestanda då man använder flera indikatorer är klart bättre då man använder en statistisk signalbehandlingsansats.

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_s}$$



Figur 24. Jämförelse mellan "traditionell" ansats som endast använder en jonströmindikator och statistisk signalbehandlingsansats där man viktar ihop flera indikatorer. Sant AFR är 1.004.

Fig. 25 visar effekten av att medelvärdesbilda jonströmsindikatorerna innan klassificeringen. Ju fler cykler som ingår i medelvärdesbildningen desto högre blir noggrannheten, naturligtvis på bekostnad av en tidsfördröjning i estimatet.



Figur 25. RMSE som funktion av antal cykler som medelvärdesbildningen omfattar.

5 SAMMANFATTANDE DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Naturgasdrivna motorer får en ökad betydelse i en mängd olika applikationer eftersom naturgas är relativt billigt och ger låga emissioner. Naturgasdrivna industriella motorer används t.ex. för att generera elektricitet, pumpa gas och driva fartyg. Driftsäkerhet, hög verkningsgrad och låga emissioner är viktiga egenskaper för dessa tillämpningar. Projektet har via experiment undersökt hur man via jonströmsmätning kan utvinna information om förbränningen i cylindrarna så att styrsystemet kan korrigera driften och optimera prestanda. Det finns ett stort behov av detta eftersom olika komponenter på motorn som t.ex. bränsleinjektorer levereras med olikheter beroende på produktionstoleranser och att de slits olika med tiden vilket ger upphov till avvikelser från cylinder till cylinder. Dessa avvikelser behöver kompenseras för under drift, d v s det finns ett stort behov av återkoppling från förbränningen i cylindrarna.

Det är emellertid mycket utmanande att utvinna information om förbränningen i cylindrarna på grund av den aggressiva miljön i förbränningskammarna. De flesta metoder använder indirekt mätning av något slag som t.ex. syremängd i avgaserna efter att de blandats i avgassystemet. Jonström erbjuder en metod för direkt mätning av förbränningen i cylindrarna. Signalen är emellertid svår att tolka och påverkas av en mängd faktorer som gjort att det varit en utmaning att använda den i praktiska tillämpningar, trots att den är så rik på information.

Detta projekt har studerat om jonström mätt i förkammaren i naturgasmotorer som körs i magerdrift kan användas för att utvinna information om förbränningsprocessen i en cylinder. Experiment och analys av data visar att sådan jonström kan användas med framgång. Det har visats hur jonström kan användas för att öka stabiliteten i förbränningen och därmed öka verkningsgraden och minska emissionerna. Vidare har visats att man kan detektera misständning och i viss mån knack som också är viktiga parametrar att övervaka vid motorstyrning.

I projektet har även en statistisk signalbehandlingsmetod för att utvinna information om luft till bränsle förhållandet i cylindrarna utvärderats på en naturgasdriven motor för tunga fordon. Resultaten visar att det är möjligt att estimerar AFR enligt denna metod med bra noggrannhet.

Slutsatsen från projektet är att jonströmsteknik med framgång kan användas för diagnos av förbränningsprocessen i cylindrarna då naturgas används som drivmedel. Genom att använda jonströmsteknik kan förbränningsstabiliteten förbättras varvid verkningsgraden ökar och emissionerna minskar.

Det behövs ytterligare forskning och utveckling för att förfina jonströmstekniken. Speciellt vore det intressant att tillämpa föreslagna metoder för återkopplad (sluten) styrning av en industriell motor som drivs med naturgas i magerdrift för att kvantifiera effekterna på motorns verkningsgrad och utsläpp av emissioner. Vidare skulle det vara av värde att vidareutveckla statistiska signalbehandlingsmetoder för bearbetning av jonströmsmätningar för att få fram mer robust och noggrann förbränningsinformation från motorer till tunga fordon som drivas av naturgas, vilket är en växande marknad.

6 REFERENSER

1. **CARB, California Air Resource Board.** Rule 1110.2 Emissions from gaseous- and liquified-fuelled engines. 2005.
2. *Engine control using cylinder pressure: past, present and future.* **Powell, David J.** 1993, Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control, Vol. 115, ss. 343-350.
3. *Detection of Partial Misfire in IC Engines Using a Measurement of Crankshaft Angular Velocity.* **Donghyeon, Lee och Rizzoni, Giorgio.** u.o. : Society of Automotive Engineers, 1995. 951070.
4. *Individual Cylinder IMEP Estimation Using Crankshaft Angular Velocity Measurements.* **Williams, Jeremy och Witter, Matthew C.** u.o. : Society of Automotive Engineers, 2001. 2001-01-0990.
5. *Ion-Gap Sense in Missfire Detection, Knock and Engine Control.* **Auzins, John, Johansson, Hasse och Nytomt, Jan.** u.o. : Society of Automotive Enineers, 1995. 950004.
6. *Estimating the Air/Fuel Ratio from Gaussian Parameterizations of the Ionization Currents in Internal Combustion SI Engines.* **Klövmark, Henrik, Rask, Patrik och Forssell, Urban.** u.o. : Society of Automotive Engineers, 2000. 2000-01-1245.
7. *Adaptative Air Fuel Ratio Control With Proportional Oxygen Sensor and Throttle Actuator.* **Anthoine, P, Dauron, A och Serine, M.** u.o. : Society of Automotive Engineers, 1992. 923009.



Scheelegatan 3, 212 28 Malmö • Tel 040-680 07 60 • Fax 040-680 07 69
www.sgc.se • info@sgc.se
