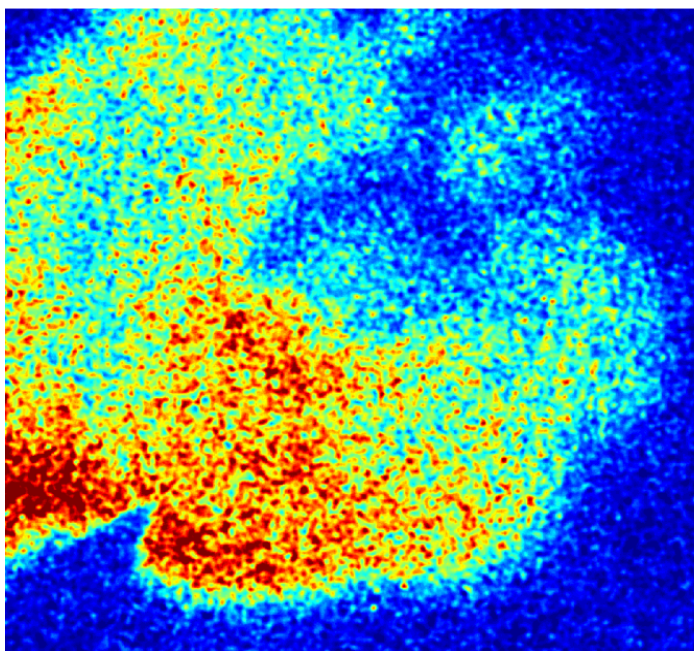


Martin Norrefeldt, Mattias Elfsberg, Torgny Carlsson

Experimentell mätning av fältvariabler vid höghastighetsförbränning med laserinducerad fluorescens



Martin Norrefeldt, Mattias Elfsberg, Torgny Carlsson

Experimentell mätning av fältvariabler vid höghastighetsförbränning med laserinducerad fluorescens

Innehållsförteckning

1	Inledning	3
2	Laserinducerad fluorescens	4
3	Experimentell verksamhet.....	5
3.1	Utrustning.....	5
3.2	Resultat.....	6
3.2.1	PLIF på vätgasflamma	7
3.2.2	PLIF i experimenttrigger	8
3.2.3	Att verifiera LIF	11
4	Slutsats och sammanfattning.....	12
	Referenser	12

1 Inledning

För att förstå och förbättra framdrivningssystem krävs experimentella studier av olika egenskaper hos förbränningsprocesser. Även om datorstödd beräkning och modellering blir allt mer kraftfull, är experiment en förutsättning för att kunna validera och utveckla modellerna. Under åren har ett otal olika typer av sensorer och experimentella tekniker för detta syfte utvecklats [1]. Vad som eftersträvas är mätmetoder som har förmåga att ta upp tidsupplöst två- och tredimensionell information om bl.a. koncentration, densitet, tryck, temperatur och hastighet utan att störa de studerade processerna. De tekniker som är mest lämpade för detta är optiska beröringsfria mätmetoder.

I denna rapport beskrivs den verksamhet som bedrivits under 2005 i projektet Framdrivning/PDE avseende diagnostisering av förbränning. Denna verksamhet initierades med syftet att utveckla FOI:s förmåga att utnyttja nya experimentella tekniker för förbränningsstudier. En del av arbetet har koncentrerats på laserinducerad fluorescens (LIF). Experimenten har utförts i den i projektet uppbyggda förbränningsriggen, där utbredning av en jetstråle som uppkommer pga. förbränning av luft/vätgas-blandning i en kavitet med ett litet utblåsningshål har studerats.

Sedan föregående år [3] finns en uppställning där LIF på flamma har genomförts framgångsrikt, om än med knappt detekterbar intensitet, med propan som bränsle. Tidigare osäkerhet om hur säkert triggnings fungerade var också undanröjd genom att samla ihop och kontrollera all information på ett oscilloskop (trigg- och slutarsignaler, ljus från laserpulsen och tryckupbyggnaden). Försöken att ta LIF-bilder i experimentriggen hade dittills dock inte givit resultat.

Under 2005 har gjorts försök på vätgasflamma, samma bränsle som det som används i riggen. Detta för att verifiera att den använda våglängden på lasern verkligen var den rätta. Service på lasrarna har gett mycket högre pulseffekt, och två nya kameror har lånats in från försäljare och testats. Lyckade PLIF-bilder har tagits på både vätgasflamman och i experimentriggen.

2 Laserinducerad fluorescens

Laserinducerad fluorescens (LIF) är en av de mest använda metoderna för förbränningsdiagnostik och den är mycket snabb och känslig. Metoden kan användas för att studera till exempel koncentrationen av förbränningsgaser, start-, mellan- och slutprodukter i förbränningszonen. Den kan också användas för att ge information om temperaturen och, för mycket snabba förlopp, hastighetsfördelningar. Det som enklast kan studeras är koncentrationer av förbränningsprodukter (här OH).

PLIF – “Planar Laser Induced Fluorescence”, är en variant av LIF och en av de vanligast använda metoderna för förbränningsstudier, den ger en näst intill tvådimensionell avbildning av ett område genom att avbilda ett tunt snitt av förbränningsområdet.

För mer information om LIF och förbränningsdiagnostik, se [1,2]. Här ges endast en kortfattad beskrivning av det för vår uppställning aktuella fallet med koncentrationsmätningar. En förbränningsreaktion sker genom ett antal reaktionssteg. I mellanstegen bildas både atomer och radikaler i stor mängd. (Radikaler är neutrala molekyelfragment med oparade elektroner, dvs. de har inte fyllda elektronskal och är mycket reaktiva.) Tre sådana så kallade intermediärer vilka bildas i de flesta förbränningsprocesser är H, O och OH. För detta projekt har vi valt att använda OH-radikalen som prob eftersom den bildas vid i stort sett all förbränning, men andra ämnen såsom t ex NO, C₂, CH och CN kan också användas vid förbränning som ger dessa produkter. Eftersom OH bildas nära flamfronten används den ofta som markör för denna.

Vid koncentrationsmätningar används en laser noggrant avstämd på en våglängd som exciterar just det ämne man vill studera. När molekylerna sedan gör sig av med energin som tillförts dem sänder de ut ljus –fluorescens, vid en våglängd som är längre än det exciterande laserljusets våglängd. Genom att detektera fluorescensen kan koncentrationen bestämmas.

3 Experimentell verksamhet

3.1 Utrustning

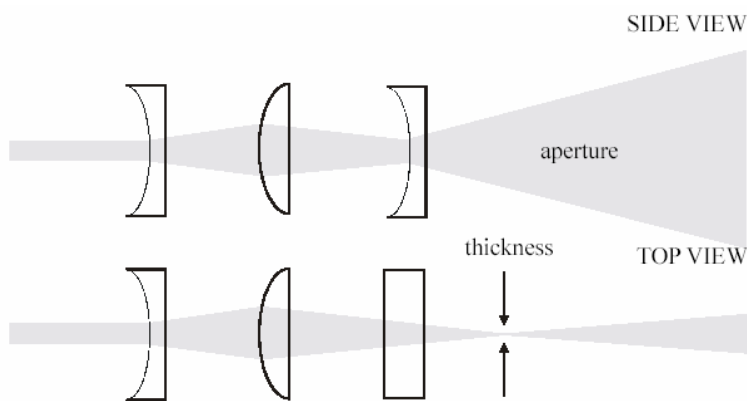
Lasrar

En EXCIMER-laser pumpar en färgämneslaser med justerbar våglängd, båda från LAMBDA PHYSIK. Färgämneslasern använder färgämnet Coumarine 153 och är inställd på att lasra vid 565.825 nm, detta frekvensdubblas till 282.91 nm i en BBO I kristall.

Under året har bägge lasrarna genomgått service och finjustering av optiken. Filtreringen av grundvåglängden och det dubblade ljuset sker nu med prismor istället för som tidigare med filter, vilket ger mindre effektförluster. Den uppnådda effekten för den dubblade våglängden har ökat mer än fem gånger, till 5.5 mJ per puls. En puls varar under 30 ns, vilket anger den kortaste tid som kan avbildas om allt ljus ska tas tillvara. Effekten i en puls är viktig när man senare ska räkna ut koncentrationer, då det krävs att systemet är mättat, dvs. att ytterligare ökning inte ger mer fluorescens från den sökta molekylen. Tyvärr har inte hela ökningen kunnat utnyttjas i årets experiment då vi inte har speglar som klarar så hög effekt.

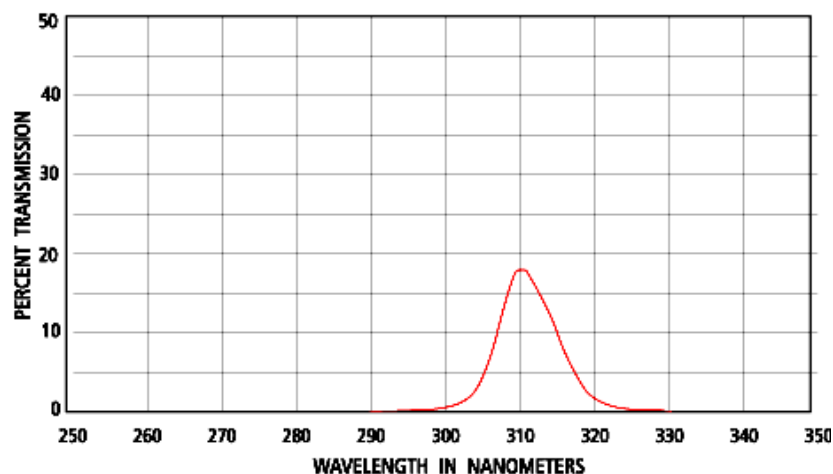
Sensorer och optik

För att generera ett tunt ljusskikt från en laserstråle används planoptik, s.k. "Light Sheet Optic" i vårt fall från LaVision. Denna består av en kombination av två sfäriska linser och en cylinderlins enligt figur 1. Linsmaterialet är kvarts för att släppa igenom UV. Skiktets tjocklek kan varieras mellan 0.5 till 2.5 mm. Fokus för linssystemet (se top view) kan varieras från 30 till 200 cm. Divergensvinkeln är 10° , vilket gör att i ett område runt fokus är skiktet relativt tunt.



Figur 1: Planoptik från LaVision.

För att försäkra sig om att så lite bakgrundsljus och spritt och reflekterat laserljus från förbränningen som möjligt kommer in i kameran används ett interferensfilter 03 FIU 121 från Melles Griot. Det släpper endast igenom nära vinkelrätt infallande ljus i ett smalt våglängdsband runt 310 nm, transmissionskurvan för detta visas i figur 2.



Figur 2: Transmissionskurva för interferensfiltret.

För att kunna avgöra när laserpulsen kommer används en mycket snabb (några få nanosekunder) fotodetektor 10AP 488-1 från UDT, som fångar spritt ljus från laserpulsens sedan den passerat förbränningszonen.

Kameror

Tre olika kameror har använts. För att karaktärisera en kameras egenskaper används flera parametrar. Storleken på bildsensorn och antal pixlar avgör storleken på det som kan få plats att avbildas och upplösningen. Kvanteffektiviteten varierar med våglängden på ljuset och avgör hur stor del av fotonerna som registreras, alltså hur ljussvaga objekt som kan avbildas. Slutartiden anger den minsta tid som kameran kan vara öppen. Då laserpulsens varar i 30 ns är inte kortare slutartider intressanta i den här uppställningen, då all fluorescens behöver detekteras. Då försöken med att ta LIF-bilder på OH i försöksriggen inte fungerat med FOI:s ICCD kamera, bestämdes att två andra kameror skulle lånas och testas.

De kameror som testats hade följande karaktäristika:

FOI:s kamera är en Jobin Yvon CCD-3000i med bildarea 26.6 mm x 6.7 mm (1024 x 256 pixlar). Den är känslig i våglängdsintervallet 190 nm – 850 nm. Kortaste slutartiden är 100 ns. Kvanteffektiviteten är upp till 23 % (ca 23 % vid 300 nm).

DH734-18U-03 från Andor Technology har en bildarea på 13.3 mm x 13.3 mm, dvs. samma area som FOI:s kamera men med 1024 x 1024 pixlar. Den är känslig i intervallet 180 nm - 850 nm. Kortaste slutartiden är 2 ns. Kvanteffektiviteten är upp till 18 % (ca 14 % vid 300 nm).

PI-MAX:1KRB-FG-43 från Princeton Instruments, med samma bildarea och antal pixlar. Den är känslig i intervallet 200 nm - 900 nm. Kortaste slutartiden är 2 ns. Kvanteffektiviteten är upp till 14 % (ca 12 % vid 300 nm) och gråskalebilddjupet är 16 bitar (65536 nivåer).

3.2 Resultat

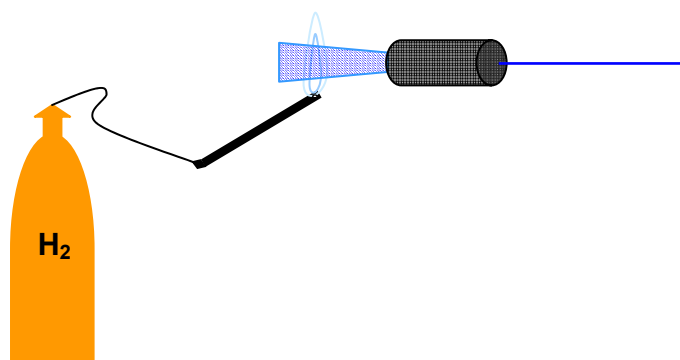
Under våren har ett flertal försöksserier genomförts för att testa de idéer som presenterades i den tidigare rapporten [3]. Med Jobin Yvon CCD-3000i prövades att ta bilder på en blandning av propan och luft i experimentriggen utan att lyckas få blandningen att tända. Den tänds bara när andelen propan är ca 4-14 %, dessutom kan den avsevärt tyngre propanen ha svårt att blanda sig ordentligt.

Ett möjligt problem som hade lagts fram för vätgas-luftblandningen var att trycket kunde leda till att fluorescensen undertrycktes av att de exciterade OH-molekylerna relaxerar av kollisioner

med andra molekyler istället för att emittera en foton (*eng.* quenching). Test med något lägre starttryck i riggen gjordes för att försöka minska den effekten, men inte heller då kunde någon fluorescens ses på bilderna. Litteratursökning gav dock bland annat att försök utförda av CECOST, The Centre for Combustion Science and Technology i Lund hade visat att mängden OH i ett liknande försök med metan-luftblandning var tillräcklig, upp till flera procent precis i början, för att kunna avbildas [4].

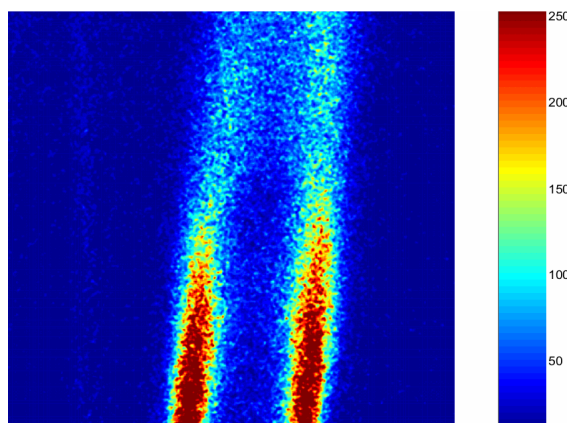
3.2.1 PLIF på vätgasflamma

För att klargöra att vi kunde göra LIF på brinnande vätgas överhuvudtaget byggdes en enkel brännare, ett stålrör med ett hål med diameter 1.3 mm. Det kopplades till en vätgastub, och trycket ut reducerades ner till 4 bars övertryck. Flamman blir då turbulent och den utströmmande gasen får hastigheten 1300m/s med ett massflöde på $3 \cdot 10^{-13}$ kg/s. Med kameran Jobin Yvon CCD-3000i togs bilder på LIF i flammen (visas ej här då senare bilder blev bättre). Nedan visas en schematisk bild av uppställningen för PLIF på vätgasflamma, se figur 3.



Figur 3: PLIF på vätgasflamma. Laserpulsens expanderar i planoptiken till ett tunt ljussnitt och genomsär lågan. Kameran är placerad vinkelrätt mot lasersnittet.

Senare togs även en PLIF-bild med kameran Princeton Technology PI-MAX:1KRB-FG-43 på OH i vätgasflamma, se figur 4. Som väntat visar ytterkanterna av flammen på störst koncentration av OH, där kontakten med den omgivande luften äger rum och OH bildas. Det inre av flammen innehåller avsevärt mindre OH, utan mest oförbränd vätgas. De suddiga konturerna kommer av det stora antal bilder som adderats och av att flammen är turbulent. En laminär strömning borde ge skarpare kanter då gränsen mellan vätgas och omgivande luft blir skarpare.



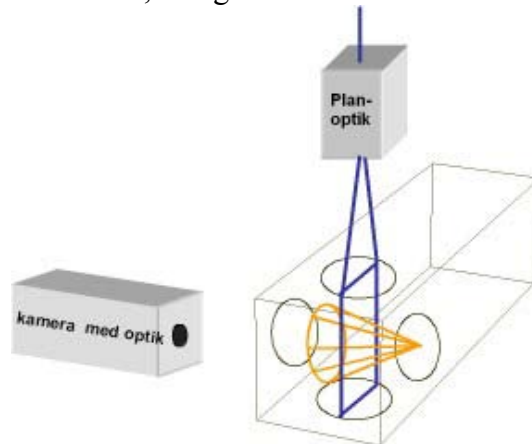
Figur 4: PLIF i vätgasflamma som visar koncentrationen av OH, tagen med 40 exponeringar på 200 ns. Bilden täcker 18x18 mm i flammen. Skalan är normerad till 256 nivåer.

3.2.2 PLIF i experimentriggen

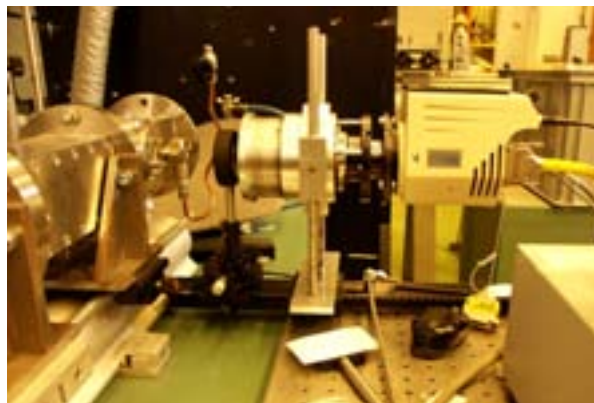
Experimentriggen beskrivs utförligt i [3].

Riggen fylls med en stökiometrisk (balans mellan bränsle och oxidator) blandning av vätgas och luft. Vid antändning av gnistan i tändstiftet byggs ett övertryck upp och en jetflamma slår ut från tändhålet. Det är från den förbränningen som vi vill detektera OH.

Laserpulsens formas till ett smalt ljussnitt med planoptiken, som placeras på sånt avstånd till riggen att snittets bredd täcker hela kamerans synfält. Ljussnittet passerar genom riggen från fönstret på ovansidan ut genom fönstret under, se figur 5. På vägen genom riggen passerar ljuset genom förbränningszonen i jetflamman. Kameran är placerad framför tändhålet och jetflamman slår alltså ut rakt mot den, se figur 6.



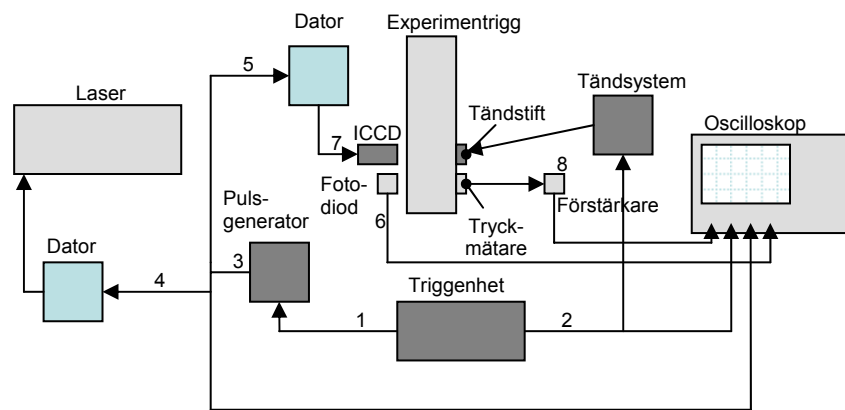
Figur 5: Schematisk uppställning av PLIF i experimentriggen, jetflamman visas i orange. Fluorescensen detekteras i rät vinkel mot ljussnittet.



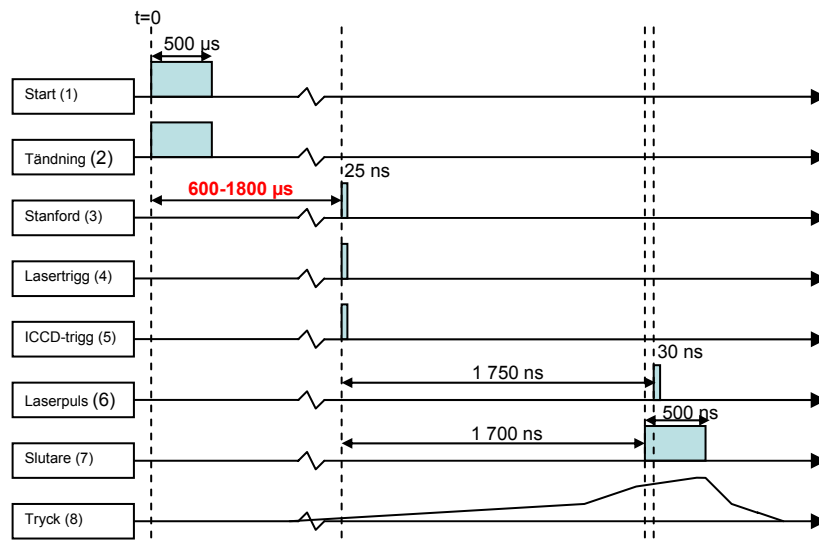
Figur 6: Uppställningen av kameran mot sidofönstret på experimentriggen.

Försöket startas av trigg enheten, som vid en knapptryckning skickar en puls till tändstiftet. Samtidigt skickas en puls till en Stanford DG535 pulsgenerator för vidarebefordring till laser och kamera. En justerbar fördröjning i pulsgeneratoren avgör när under tryckuppyggnaden (brinntiden) kameran triggas. Schematisk uppställning med tidsschema visas i figurerna 7 och 8.

Kameran ska öppna när laserpulsens passerar genom förbränningszonen och vara öppen tillräckligt länge för att fånga allt fluorescensljus. För lång slutartid ökar bakgrundsstrålningen från förbränningen. I vårt fall användes slutartiden 500 ns, förmodligen för lång för optimalt resultat, men medger goda marginaler. De bägge kameror som vi lånade gav även en utsignal så man på oscilloskopet kunde avgöra när slutaren var öppen. Man kan då kontrollera att triggningen fungerat som planerat, och i efterhand avgöra var under brinntiden en bild tagits. Tändgnistan jitrar dock med några hundra mikrosekunder, vilket hade stor inverkan på var under brinntiden bilden togs. Det fanns dock marginaler då brinntiden var åtminstone 1 ms.



Figur 7: Schematisk bild av experimentuppställningen.

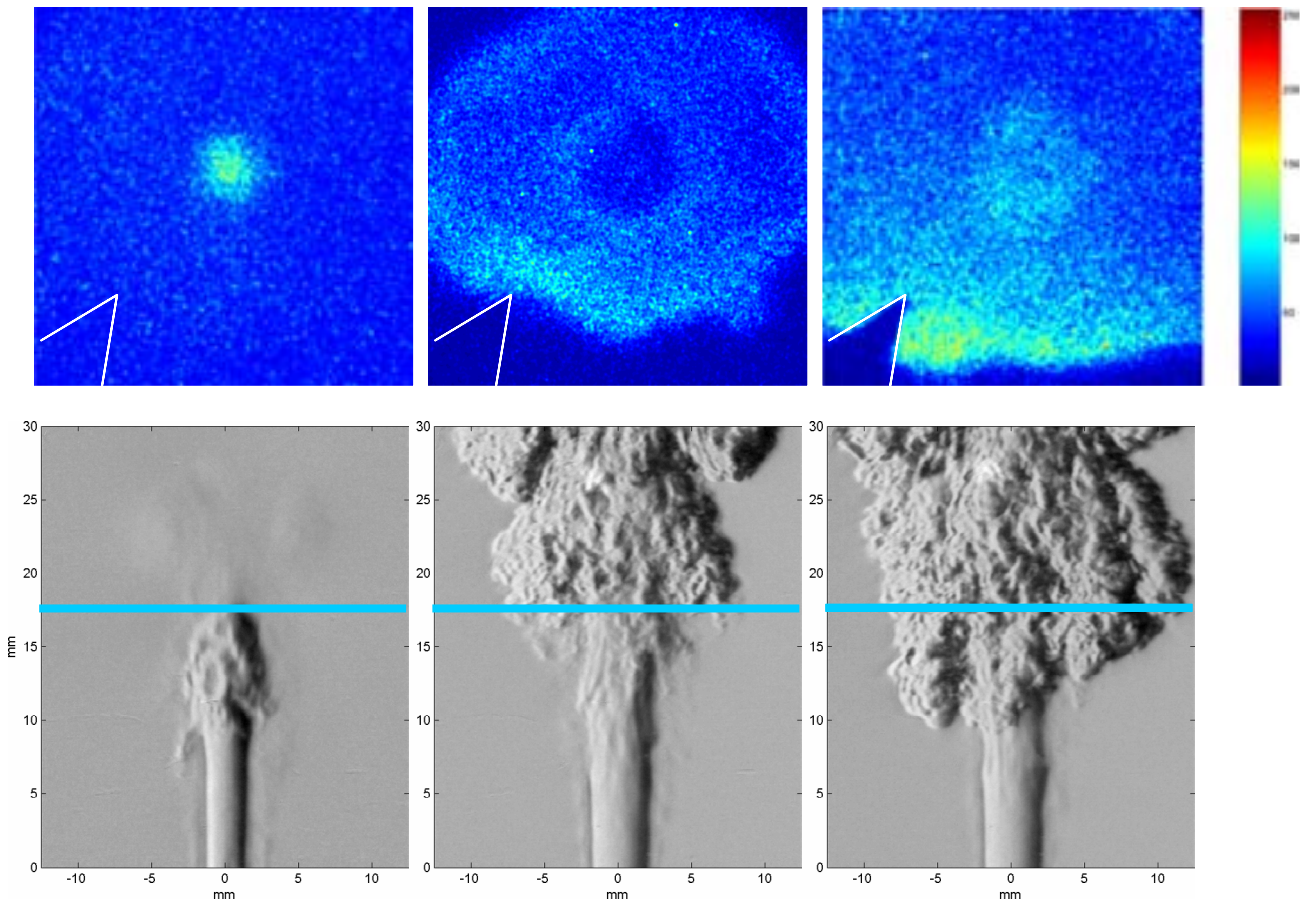


Figur 8: Tidsschema för triggprocessen. Med fördröjningen i pulsgeneratoren (tid i rött) avgörs var under tryckuppsygnaden bilden tas. Tidsinkrementen är inte skalenliga.

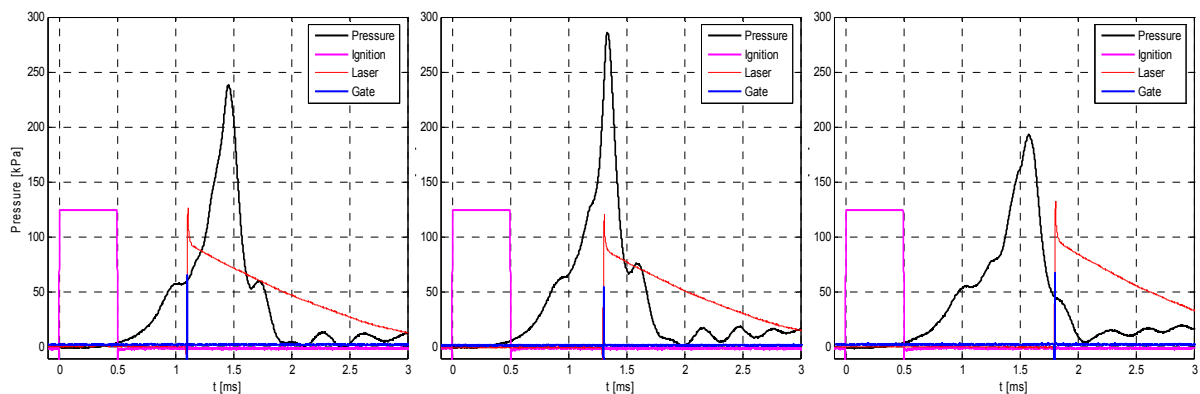
Ett enkelt optiskt system användes för att fånga in fluorescensen: ca 240 mm från ljussnittet sitter en plankonvex lins och en bländare och ca 120 mm bakom den ligger bildfältet på kameran. Avstånden är valda så att det sker en viss förminskning och nästan hela riggens fönster med diameter på 40 mm får plats på kamerachipet. Mitt emellan kamera och lins sitter interferensfiltret, som bara transmittar fluorescensvåglängden.

Bilder togs med DH734-18U-03 från Andor Technology vid tidpunkterna (från vänster) 1100, 1300 och 1800 μs efter tändningen, se figur 9. Jetflamman skjuts ut rakt mot kameran från tändhålet som kan anas mitt i bilderna. Nere till höger i varje bildfält (markerad med vit ram) skymmer en trekant fönstret, för att ge en ”svart” referens.

Som jämförelse visas i samma figur Schlierenbilder på jetflamman tagna i experimenttriggen [3] som visar dess ungefärliga utseende vid dom olika tidpunkterna. För att kunna fastställa var under brinntiden en bild togs och därmed hur jetflamman ser ut, användes oscilloskop, se figur 10. Topptrycket nås vid olika tidpunkter vilket visar på hur mycket tändningen jitrar.



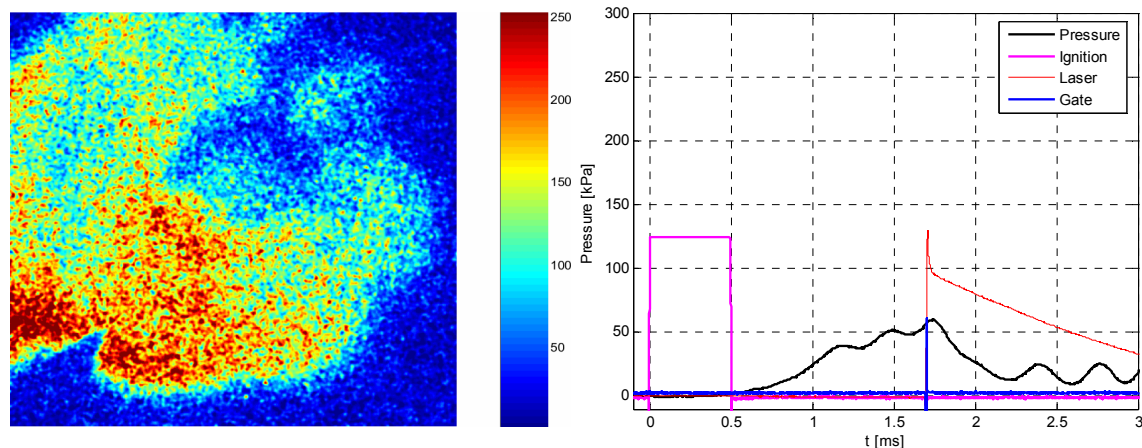
Figur 9: PLIF på OH i jetflamman i experimenttriggen (ovan). Bildfältet är 30 x 30mm och skalan normerad till 256 nivåer. Som jämförelse (nedan) för hur jetflamman kan se ut har Schlierenbilder tagna från sidan lagts in med placeringen av lasersnittet i blått.



Figur 10: Oscilloskopavläsning för PLIF-bilderna i förra figuren. Den detekterade laserpulsen och kamerans slutartid (gate) visar när bilderna är tagna.

På grund av den turbulens som råder när de två sista bilderna är tagna finns ingen klart definierad flamfront. Vätgas och luft är blandad och förbränning pågår över mer eller mindre hela snittet. Den första bilden visar jetflamman tidiga laminära läge och där syns också en klart definierad flamfront. Att tändhålets konturer anas kan bero på att det på den tidigare mellersta bilden fortfarande råder ett laminärt flöde, där det mest finns oförbränd vätgas. På den senare bilden har detta flöde brutits upp. De två senare bilderna, liksom den i figur 11, visar bågiga högre intensitet i nedre kanten av okänd anledning. Det kan bero på hur geometrin ser ut där antändningen sker.

Många ytterligare bilder togs, den med högst intensitet på fluorescensen visas figur 11. Oscilloskopavläsningen för när bilden togs visas också. Små avvikelser i blandningen tenderade att ge en annan förbränning och ett högt topptryck uteblev ofta, vilket nog är det som skett här. Den höga intensiteten kan bero på att vi träffat precis i framkanten av molnet, där förbränningen är som intensivast.



Figur 11: PLIF på jetflamman i riggen. Utseendet på jetflamman kan inte sägas säkert då blandningsförhållandet förmodligen påverkat förbränningen. Skalan är normerad till 256 nivåer.

3.2.3 Att verifiera LIF

Bekräftelse krävs på att det verkligen är laserinducerad fluorescens och inte bara Rayleigh-spridning av laserljuset och spontanemission från förbränningen som avbildats. Även om filtret tar bort nästan allt ljus vid den våglängd som Rayleigh-sprids så kommer den höga intensiteten i laserpulsens att göra att en inte försumbar del ändå når detektorn. Den höga temperaturen i flammen gör att den emitterar över hela spektrat, en viss del av denna spontanemission kommer ha en våglängd nära fluorescensens våglängd och passera genom filtret.

För att avfärda dessa effekter togs varierande bilder med lasern på den våglängd som exciterar OH och därmed ger fluorescens, och med en våglängd 0.5 nm från denna våglängd, tillräckligt för att inte excitera och ge fluorescens. Rayleigh-spridningen är densamma, men fluorescensen ska helt saknas och bilderna ska i stort sett bli svarta, vilket de också blev. På grund av opålitligheten i tändningen kan man inte styra exakt när under förbränningen som en bild tas. Fluorescensen och spontanemissionen från förbränningen kan därför variera avsevärt mellan olika bilder. För att avsevärt minska risken att det är just såna tillfälligheter som gör att de bilder som är tagna vid den icke-exciterande våglängden är svarta togs upprepade bilder med exciterande våglängd respektive icke-exciterande våglängd. Varje försök med den exciterande våglängden gav en bild med innehåll, de vid den icke-exciterande våglängden blev samtliga svarta.

4 Slutsats och sammanfattning

LIF som metod för att mäta framför allt koncentrationsfält i 2D av t ex OH är en snabb och välbeprövad mätmetod. Tillämpad på problem i förbränningsstudier kan den ge information till stöd för beräkningar. Försöken i år har visat att vi behärskar tekniken. Först gjordes försök med att avbilda OH med PLIF i en vätgasflamma, samma bränsle som det som används i riggen. Senare togs även motsvarande bilder i experimentriggen. Service på lasrarna har gett mycket högre pulseffekt, och två nya kameror har lånats in från försäljare och testats.

Vår utrustning ännu inte är optimal i alla delar. Lasrarna fungerar tillfredställande och har tillräcklig effekt, men vår kamera verkar inte ha tillräckligt bra dynamik. Vid jämförelse med två nya kameror så framstod det tydligt att den var den svaga länken. Fortfarande återstår att ta bilder som sedan används till beräkningar av verkliga koncentrationer, och för det behöver bildkvaliteten förbättras ytterligare. Det finns fortfarande möjligheter till förbättringar. Till exempel ett optiskt system som kan placeras närmare riggen och tar upp en större del av ljuset, kortare slutartid för att minska bruset, bättre speglar till lasern för att få fram mer energi och bättre bildkvalitet.

I kombination med andra tekniker, som CARS för temperaturmätningar i enstaka punkter och sliravbildning och interferometri för densitetsfördelningar, så har vi användbara verktyg för avancerade förbränningsstudier.

Referenser

- [1.] R. J. Goldstein (editor), *"Fluid mechanics measurements"*, Taylor & Francis, Washington, D.C., 1996.
- [2.] S. Wallin, M. Norrefeldt, M. Elfsberg, *"Förbränningsdiagnostik med laserinducerad fluorescens på OH-radikalen"*, FOI-R--1071--SE, 2003
- [3.] Carlsson, T., M. Norrefeldt, M. Elfsberg, *"High speed combustion- Activities during 2004"*, FOI-R--1378--SE
- [4.] Dreizler, A. et al, *"Characterisation of a spark ignition system by planer laser-induced fluorescence of OH at high repetition rates and comparison with chemical kinetic calculations"* Applied Physics B, 70 287-294 (2000).

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1649--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning och skydd	
	Månad, år Mars 2005	Projektnummer E 2006
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Martin Norrefeldt Mattias Elfsberg Torgny Carlsson	Projektledare Bengt Eiderfors	
	Godkänd av Jon Tegnér	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Experimentell mätning av fältvariabler vid höghastighetsförbränning med laserinducerad fluorescens		
Sammanfattning (högst 200 ord) En redogörelse för det arbete som bedrivits under våren 2005 i projektet Framdrivning/PDE i delen för diagnostisering av höghastighetsförbränning. Verksamhetens syfte är att utveckla FOI:s förmåga att utnyttja experimentella metoder för förbränningsstudier, bland annat laserinducerad fluorescens (LIF). Tekniken är användbar för att avbilda tvådimensionella fält av bl a temperatur och koncentration av förbränningsprodukter. I rapporten beskrivs framstegen gjorda i år inom detta område, liksom förändringar i experimentell teknik och utrustning. Experiment har utförts i den för projektet byggda experimenttriggen, där förbränning sker av en blandning av vätgas och luft. Resultatet är avbildningar av OH i ett tunt skikt i förbränningszonen under olika tidpunkter.		
Nyckelord laserinducerad fluorescens, OH, förbränning, experimentella metoder, ICCD		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 15 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons and Protection SE-147 25 Tumba	Report number, ISRN FOI-R--1649--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 5. Strike and protection	
	Month year March 2005	Project no. E 2006
	Subcategories 51 Weapons and Protection	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Martin Norrefeldt Mattias Elfsberg Torgny Carlsson	Project manager Bengt Eiderfors	
	Approved by Jon Tegnér	
	Sponsoring agency FM	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Experimental measurement of field variables in high speed combustion using laserinduced fluorescence		
Abstract (not more than 200 words) An account is given of the work that has been done during the spring of 2005 within the FOI project Framdrivning/PDE (Propulsion/PDE) regarding diagnostics of high speed combustion. The purpose of the project is to develop FOI's ability to use experimental techniques for propulsion studies, for example by using laser induced fluorescence (LIF). This technique can be used for two-dimensional imaging of temperature and concentration of combustion products. The improvements done during the last year within this field are described, as well as changes in experimental technique and equipment. Experiments have been done in the experimental combustion rig, built for this purpose, where a mixture of air and hydrogen was burnt. The results are images of thin sheets of OH in the combustion zone at different times.		
Keywords laser induced fluorescence, OH, combustion, experimental methods, ICCD		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 15 p.	
Price acc. to pricelist		