

Jon Tegnér och Stefan Olsson

Försök med PDE med multipel insprutning

Vapen och skydd

147 25 TUMBA

TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Vapen och skydd
147 25 TUMBA

FOI-R—0925--SE

September 2003

ISSN 1650-1942

Teknisk rapport

Jon Tegnér och Stefan Olsson

Försök med PDE med multipel insprutning

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd 172 90 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R—0925--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning	
	Månad, år September 2003	Projektnummer E 2006
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
Författare/redaktör Jon Tegnér Stefan Olsson	Projektledare Bengt Eiderfors	
	Godkänd av Torgny Carlsson	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Försök med PDE med multipel insprutning		
Sammanfattning (högst 200 ord) En pulsdetonationsmotor med multipel insprutning har konstruerats. Numeriska experiment har tidigare visat att de heta restprodukterna från den föregående pulsen kan ha en gynnsam inverkan på initieringen av detonationen i den följande pulsen, och den motor som beskrivs i denna rapport har konstruerats för att studera att kunna dra nytta av denna effekt. I de inledande experimenten har ännu inga detonationer detekterats, men som en grund för det fortsatta arbetet presenteras resultaten från dessa inledande experiment.		
Nyckelord Pulsdetonationsmotor, förbränning, detonationer, deflagrationer, stötvågor, övergångar från deflagration till detonation, radikaler.		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 25 s	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons & Protection SE-172 90 Stockholm	Report number, ISRN FOI-R—0925--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 5. Combat	
	Month year September 2003	Project no. E 2006
	General Research Areas 5. Contracted Research	
	Subcategories 51. Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Jon Tegnér Stefan Olsson	Project manager Bengt Eiderfors	
	Approved by Torgny Carlsson	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Experiments with a PDE using multiple injection		
Abstract (not more than 200 words) A Pulse Detonation Engine using premixed fuel/air and multiple injection has been constructed. Numerical simulations have shown that the hot products remaining from a previous cycle can facilitate the initiation of the detonation in the following pulse, and the engine described in this report has been constructed to study and take advantage of this effect. However, no detonations have been detected in these preliminary experiments, but as a base for the continuing effort a detailed presentation of the obtained result are given.		
Keywords Pulse detonation engine, combustion, detonations, deflagrations, shock waves, deflagration to detonation transitions, radicals.		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages: 25 p	
	Price acc. to pricelist	

Innehåll

1	Introduktion	5
2	Motorn och övrig experimentuppställning	6
3	Experiment	9
3.1	Experiment andra juli 2003	9
3.2	Experiment tredje juli 2003	11
3.3	Experiment fjärde juli 2003	14
3.4	Experiment tjugosjunde augusti 2003	16
3.5	Experiment tjugoåttonde augusti 2003	19
3.6	Experiment fjärde september 2003	20
4	Slutsatser/fortsatt arbete	22

Försök med PDE med multipel insprutning

*Jon Tegnér, Stefan Olsson **

1 Introduktion

Forskningen rörande pulsdetonationsmotorer (eller PDE, efter “Pulse Detonation Engine”), som under ett antal år bedrivits vid FOI/Grindsjön, har på senaste tiden varit inriktad på att studera effektiva metoder för att initiera detonationen i motorn. Just detta moment är ett av de viktigaste – och också det svåraste – som måste lösas innan en praktiskt användbar, luftandande PDE kan konstrueras. Betydelsen av en effektiv initiering är utredd i ett stort antal artiklar, t.ex. [1], men kan sammanfattas med att en termodynamiskt effektiv drift förutsätter att förbränningen äger rum i form av en detonation i större delen av motorn. Svårigheterna består i att direktinitiering av detonation i t.ex. en vätgas/luftblandning kräver energier om tusentals Joule, eller – om förbränningen startar i form av en vanlig flamma – så måste denna flamma ofta utbreda sig många meter innan en detonation eventuellt bildas. För mer praktiska bränslen – som t.ex. flygfotogen – är kraven än högre.

PDEn har flera egenskaper som gör att den skulle kunna vara en konkurrenskraftig ersättare till flera av dagens motortyper, bland annat har den potentialen att vara betydligt billigare än en turbojetmotor och ha ett större hastighetsregister än en rammotor, [2]. Innan detta kan uppnås måste dock problematiken rörande initieringen av detonationen i praktiska bränslen lösas. Det övergripande målet – där det här redovisade resultaten utgör en del – är därför att studera och finna metoder som gör det möjligt att använda denna typ av bränslen i pulsdetonationsmotorer.

I denna rapport beskrivs hur en motor – baserade på resultat från numeriska beräkningar – konstruerats. Vidare beskrivs de inledande försök som genomförts med denna motor. De numeriska simuleringarna är i detalj beskrivna i [3] och [4]. För att dessa simuleringar ska vara möjliga att genomföra med rimliga datorresurser och på rimlig tid måste ett antal förenklingar införas i den matematiska modellen, men inom ramen för dessa förenklingar indikerar dessa resultat en möjlig metod att reducera de krav på energi och utbredningslängd som kortfattat diskuterats ovan.

Motorer som fungerar med vätgas som bränsle finns redan vid flera forskningsanläggningar, t.ex. Volvo i Trollhättan och Wright Pattersons Air Force Base i USA. Även den motor som beskrivs i denna rapport är initialt avsedd för att använda vätgas som bränsle, men det viktigaste syftet är att experimentellt undersöka om metoderna för att underlätta initieringen av detonationen fungerar i praktiken – detta är speciellt viktigt eftersom de förenklingar som införts i simuleringarna innebär att viktiga moment i den fysikaliska processen har försummats.

En vanlig metod att underlätta initieringen av detonationen är att addera någon komponent – oftast syre – till bränsle/luftblandningen vilket gör blandningen mer känslig. Eftersom syret måste

*FOI, 172 90 Stockholm, Sweden

tas med på farkosten har denna metod nackdelen att motorns specifika impuls reduceras. För att minimera denna reduktion strävar man i regel efter att endast addera syret i en mindre del av motorn, i direkt anslutning till tändpunkten. En annan metod är att använda turbulensgenererande hinder i förbränningskammaren, vilka gör att flamman accelererar snabbare och att en eventuell övergång till detonation kan uppnås på en kortare längd. Denna metod genererar dock förluster i strömningsfältet vilket leder till både minskad dragkraft och minskad specifik impuls. För mindre känsliga bränslen än väte är det dessutom av effektivitetsskäl i regel nödvändigt att kombinera båda dessa metoder.

De numeriska simuleringarna har visat att de förbränningsprodukter som finns kvar i motorn i slutet av varje cykel – när trycket på drivplattan sjunkit till atmosfärstryck och motorn ej längre genererar någon dragkraft – på liknande sätt som syre också gör blandningen känsligare. Men till skillnad från syre behöver dessa restprodukter ej tas med ombord på farkosten varför denna metod ej reducerar motorns specifika impuls. Skulle inblandning av restprodukterna dessutom möjliggöra initiering utan att använda turbulensgeneratorer slipper man även nackdelarna förknippade med dessa. Det största vinsten vore dock om restprodukterna skulle kunna utnyttjas på ett sådant sätt att tillförlitliga detonationer erhålls i bränsle/luftblandningar med något "praktiskt" bränsle (flygfotogen) – något som inte (till författarnas kännedom, september 2003) redovisats i litteraturen.

Resultaten från de numeriska simuleringarna – det faktum att förbränningsprodukterna kan användas för att göra blandningen lättare att initiera – har använts för att konstruera en motor. Denna är byggd efter följande principer:

- I syfte att erhålla ett medium som är enklare att detonera blandas den kalla blandningen av bränsle och luft med förbränningsprodukterna före antändning.
- Strävan efter att uppnå en homogen blandning i hela motorn. Detta för att erhålla en så stor volym som möjligt i vilken övergången till detonation kan studeras.
- För att förhindra och försvåra uppkomsten av reaktionszoner utom den i direkt anslutning till detonationsfronten minimeras tiden mellan insprutning och antändning.

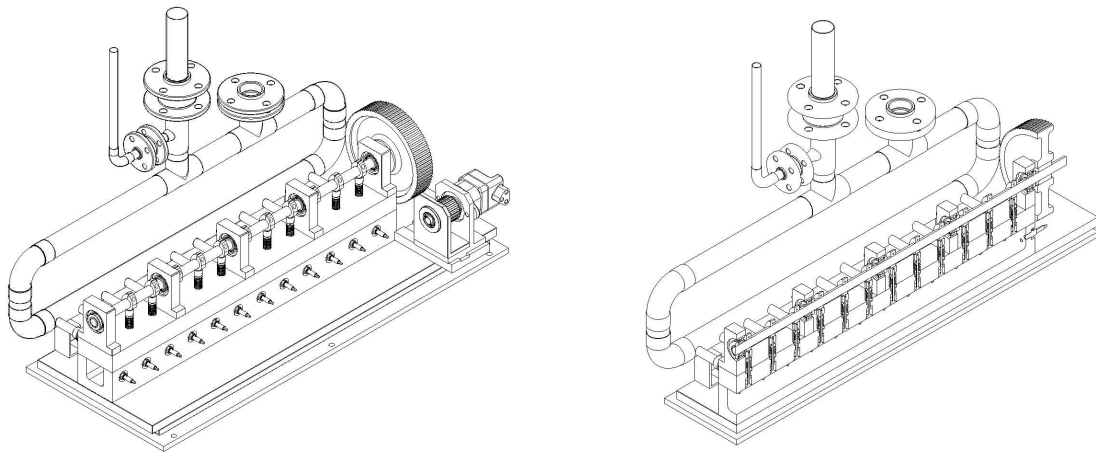
Den motor som är baserad på dessa principer består i korta drag av:

- En blandningskammare i vilken vätgas och luft blandas.
- Tolv ventiler, genom vilka bränsle/luftblandningen sprutas in i motorn.
- Ett tändstift i främre delen av motorn där blandningen antänds.

Ventilerna öppnas och stängs av kamnockar på en axel vilken drivs av en hydraulmotor. Dessa och övriga komponenter beskrivs närmare i kapitel 2.

2 Motorn och övrig experimentuppställning

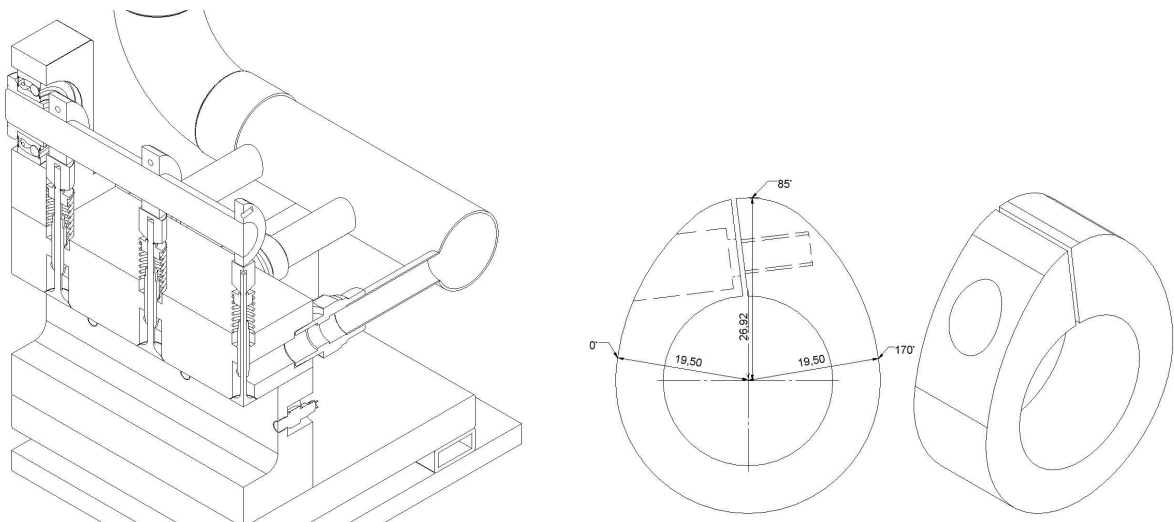
Motorns förbränningskammare har ett kvadratisk tvärsnitt om 60x60 mm med de två undre hörnen rundade. Kammaren är 960 mm lång vilket ger en volym av 3.41 liter. Förbränningskammaren förses med en färdigblandad bränsle/luftblandning med hjälp av 12 ventiler som är symmetriskt fördelade med 80 mm delning längs hela motorns längd. Två bilder av motorn visas i figur 1 som



Figur 1: Hela motorn, med kringutrustning.

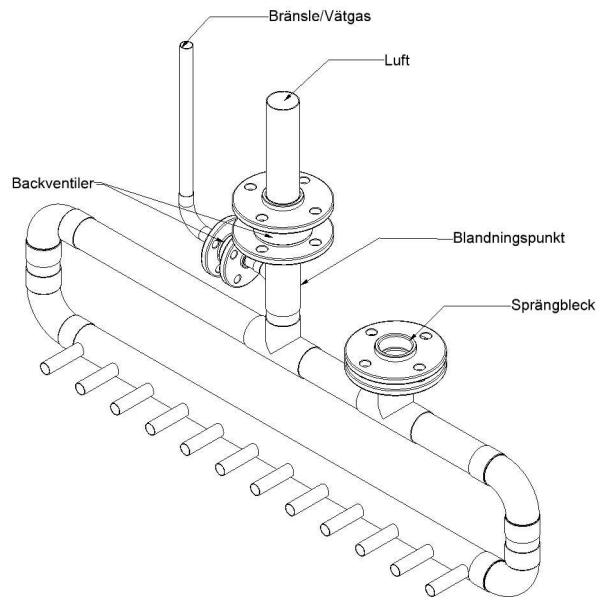
förutom förbränningskammaren och ventilmekanismen även illustrerar blandningskammaren och drivsystemet för axelmekanismen.

Ventilerna med tillbehör är ursprungligen avgasventiler från en motorcykel, Yamaha FZ 750 och lyftkurvan på kammarna som styr ventilerna är tagen från avgaskamaxeln från densamma. Ventildiametern är 23 mm och den maximala lyfthöjden är 7.4 mm. Kamnockarna har tillverkats med en slits – och kläms fast vid axeln med en skruv – ett förfarande som på ett enkelt sätt möjliggör individuella inställningar av alla tolv ventilerna. Ventiler och kamnockar är illustrerade i figur 2. I



Figur 2: Ventilmekanism och kamnockar.

denna figur är vinklarna som används för att beskriva ventilernas öppnande och stängande införda. Vinkeln 0° definierar den punkt på varvet då lyftkurvan är tillbaks på nockens grundcirkel, men på grund av ventilspelet på ca. 0.2 mm så sker stängningen av ventilerna något innan den valda



Figur 3: Blandningskammaren.

stängningsvinkeln (ca. 20° om stängningsvinkeln är 0°).

Matningsröret, eller blandningskammaren, är tillverkade av kopparrörskomponenter för vattenledningssystem (54 och 22 mm diameter). En bild av denna konstruktion återges i figur 3. Matningsröret har utformats efter följande kriterier:

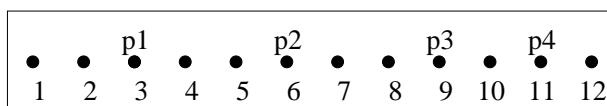
- Minimal tryckdifferensen mellan ventilerna.
- Dämpningar av stötvågor från ventilerna.
- Tillräckligt stor volym (ungefär 3 ggr större än förbränningskammaren) för att erhålla högsta möjliga dämpning av tryckvariationer i systemet.

Blandningskammaren är försedd med ett sprängbleck av $100 \mu\text{m}$ mylarfilm och med en diameter av 54 mm.

Ventilmekanismen drivs av en högvarvig hydraulmotor och transmissionen från denna hydraulmotor till drivaxeln sker med tandrem (vilket illustreras i figur 1). Med nuvarande utväxling (1:4) är den maximala frekvensen 40 Hz (det är möjligt att endast öppna varannan ventil i varje puls och därmed erhålla 80 Hz med nuvarande utväxling). Högre varvtal kan erhållas genom att byta utväxling till 1:2 samt slipa kamnockar med dubbla lobber för att därmed erhålla 160 Hz med samtidig öppning av alla ventilerna.

Flödesreglering och mätning sker över en strypfläns där kritisk strömning råder och det flöde som önskas erhålls genom att manuellt justera trycket före strypningen. Mätdata samplas och sparas på en persondator

Under de inledande försöken har motorn baktänt, dvs. mycket heta gaser eller en flamma har varit kvar i förbränningsrummet när ventilerna öppnats för att fylla på med bränsle/luftblandning för nästa puls. Detta resulterar i oönskad förbränning in i blandningskammaren, med påföljd att



Figur 4: Tryckgivarnas placering vid experiment den andra juli 2003.

sprängblecket brister. För att undvika detta problem har en provisorisk renblåsning monterats i tryckgivarhålet på förbränningskammarens gavel, vilken kontinuerligt blåser in luft i motorn.

Förbränningskammaren är utrustad med 12 tryckgivarhål på ena sidan och 12 tändstiftshål på den andra. Dessutom finns ett tryckgivarhål och ett tändstiftshål på den främre gaveln. Tändstiften kan – förutom att tända bränsleblandningen – även användas till att mäta mediets ledningsförmåga för att på så sätt mäta hur förbränningszonen rör sig i motorn (detta har dock inte gjorts vid dessa försök).

3 Experiment

I detta kapitel redovisas resultaten från de inledande experimenten. Även om motorn ännu inte opererar på det önskade sättet (med en detonation som rör sig stabilt genom större delen av motorn) kommer resultaten att redovisas förhållandevis detaljerat. Det finns en mängd olika parametrar att variera och i dessa inledande experiment har fokus i högre grad varit inriktat mot att snabbt få motorn att fungera än att göra en systematisk parametervariation. På grund av detta är det därför inför de fortsatta studierna viktigt att så detaljerat som möjligt redogöra för de ändringar som gjorts och vad dessa ändringar resulterat i. Förslag på modifikationer – baserade resultaten från dessa inledande försök – kommer att diskuteras i kapitel 4.

De olika experimenten redovisas i kronologisk ordning i separata kapitel nedan och en översikt av värdena på de olika parametrar som använts, samt en kortfattad beskrivning av de erhållna resultaten är redovisade i tabell 1. Ett sätt att detektera en detonation är genom dess höga tryck (runt 2 MPa). Som ett mått på effektiviteten av de olika försöken har därför den maximala tryckstegring som uppmätts noterats i tabellen (det högsta värde som uppnåtts är 0.62 MPa).

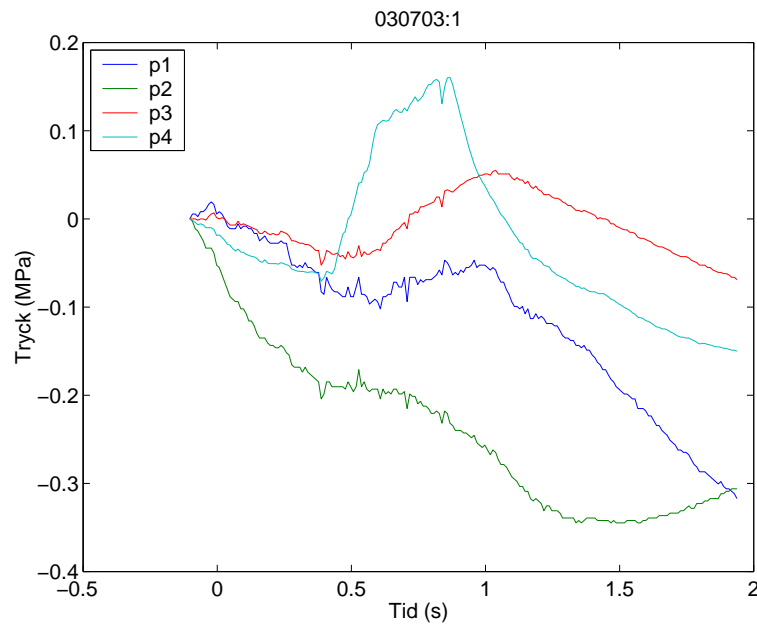
3.1 Experiment andra juli 2003

I första försöket arbetade motorn med frekvensen 21.5 Hz och med blandningstalet $\Phi = 0.98$. Fyllnadsgraden uppskattades till 0.93, och tändvinkeln var 50° . Tändstiftet var placerat på frontgaveln (betecknat med position 0 i tabell 1) och mätsystemet var inställt att samla in data med samlingsfrekvensen 500 kHz, vilket med den aktuella hårdvaran räcker för att samla in data under två sekunder från fyra tryckgivare placerade vid tryckhålen indikerade i figur 4.

I detta fall uppnådes ingen pulserande drift, i stället hördes en kraftig smäll varpå systemet baktände och sprängblecket i förblandningskammaren brast, i övrigt gick inget sönder. Eftersom mätsystemet var inställt att triggas manuellt erhöles inga data i detta fall.

#	Fyllnadsgr.	Φ -tal	tändvinkel	f	Tändplac.	Renbl.
3/7 2003						
1	0.95	1.1	50	22	0	15
	Två puffar, därefter baktändning					
2	2.0	0.98	50	10	0	15
	Opererar pulserande, givare bottnar					
3	2.0	0.99	50	10	0	15
	Opererar pulserande, max tryckstegring 0.53 MPa					
4/7 2003						
1	1.8	1.1	50	10	0	15
	Opererar pulserande, max tryckstegring 0.62 MPa					
2	2.1	0.70	50	9.6	0	15
	Opererar pulserande, max tryckstegring 0.27 MPa					
27/8 2003						
1	2.0	0.68	25	10	0	15
	Opererar pulserande, max tryckstegring 0.42 MPa					
2:1	1.9	0.76	1	9.6	0	15
	Opererar pulserande, max tryckstegring 0.50 MPa					
2:2	1.9	0.76	1	9.6	0	7
	Opererar pulserande, max tryckstegring 0.24 MPa					
28/8 2003						
1	1.7	0.91	1	10	0	15
	Opererar pulserande, max tryckstegring 0.26 MPa					
2	1.7	0.89	1	10	2	15
	Opererar pulserande, max tryckstegring 0.21 MPa					
4/9 2003						
1:1	1.2	1.1	1	10	0	15
	Opererar pulserande, max tryckstegring 0.46 MPa					
1:2	1.2	1.1	1	10	0	7
	Opererar pulserande, max tryckstegring 0.26 MPa					
2:1	1.1	0.80	1	10	0	15
	Opererar pulserande, max tryckstegring 0.35 MPa					
2:2	1.1	0.80	1	10	0	7
	Opererar pulserande, max tryckstegring 0.20 MPa					
3:1	1.0	0.77	1	10	0	15
	Opererar pulserande, max tryckstegring 0.30 MPa					
3:2	1.0	0.77	1	>10	0	15
	Opererar pulserande, max tryckstegring 0.24 MPa					

Tabell 1: Översikt över hittills genomförda försök.



Figur 5: Första experimentet den tredje juli 2003.

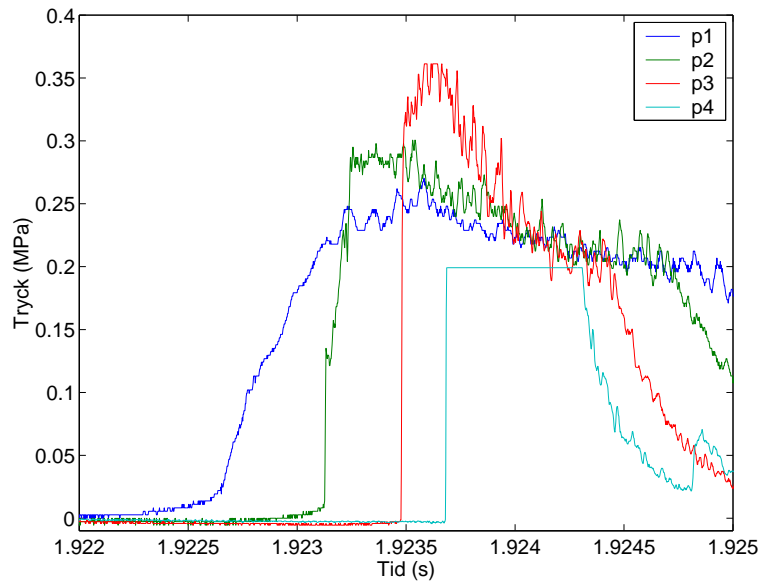
3.2 Experiment tredje juli 2003

I ett försök att förhindra baktändningen kopplades renblåsningsluft in till givarutttaget på frontgaveln. Önskvärt vore att endast låta renblåsningsluften flöda från den tidpunkt dragkraften slutat ge positivt bidrag tills precis före den nya bränsle/luftblandning sprutas in. Emellertid skulle detta kräva större modifiering av experimentuppställningen, varför – för enkelhets skull – renblåsningsluften kontinuerligt sprutas in under hela pulsen. Flödet bestäms av det matartryck som ställs in på manometern, i detta fall 1.5 MPa, vilket resulterade i ett flöde om $26 \text{ m}^3/\text{h}$, vilket – under antagande av standard atmosfärstryck – motsvarar 8.7 g/s .

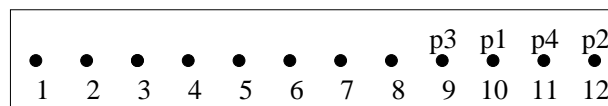
Förutom renblåsningsluften var förhållandena desamma som i det föregående försöket. När motorn startades denna gång hördes två kraftiga smällar varefter den baktände och sprängblecket åter igen brast. I detta fall var datainsamlingssystemet inställt att trigga på givare p2 (vid position 6, se figur 4). Ett förhållandevis stort utslag kunde noteras vid givare p4 (position 11, se figur 5).

Eftersom renblåsningssystemet i nuvarande form inte är särskilt effektivt och då dess flöde inte utan ombyggnad kan ökas kan effekten av denna begränsade renblåsning i stället ökas genom att minska motorns frekvens. I detta fall ställdes hydraulmotorn in för att arbeta med en frekvens om 10 Hz. Eftersom samma inställningar behölls på både huvudluften och vätgasen ökade fyllnadsgraden till 2.0. Blandningstalet var ungefär detsamma som tidigare och mättes i detta fall upp till $\Phi = 0.98$.

Efter denna ändring opererade motorn med pulserande förbränning, dock bottnade givarna p3 och p4, vilket illustreras av tryckkurvorna i figur 6 där tryckkurvorna för den sista pulsen i de data som samlats in visas. Även om signalerna från givarna p3 och p4 bottnade, så kan hastigheten på fronten mellan dessa bägge givare uppskattas genom att dividera avståndet mellan givarna (0.16 m) med tidsskillnaden mellan stötvågens ankomsttider. Detta ger en hastighet runt 790 m/s , dvs. lägre än hastigheten för en utbildad detonation (ungefär 1950 m/s för en stökiometrisk vä-



Figur 6: Andra experimentet den tredje juli 2003.

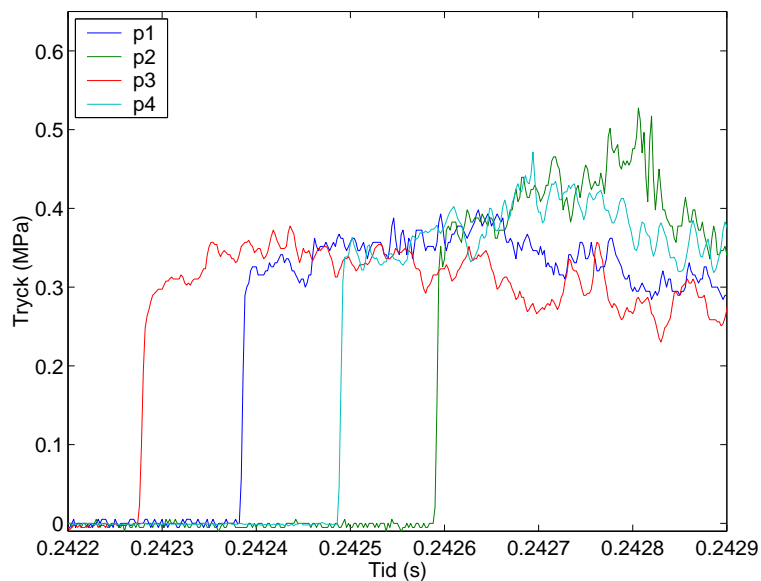


Figur 7: Tryckgivarnas placering vid det tredje experiment den tredje juli 2003.

gas/luftblandning).

På grund av att de sista två givarna bottnade går det inte att utesluta att en detonation bildades mellan dessa två givare. För att undersöka detta placerades samtliga givare på de sista fyra givaruttagen. Givare p1 flyttades till position 10 och givare p2 flyttades till position 12, se figur 7 där givarnas nya placering är indikerade. Även vid detta experiment opererade motorn med pulserande förbränning så länge den extra renblåsningen var påslagen. Denna gång stängdes renblåsningen av under gång – varvid motorn baktände och sprängblecket brast. Ett exempel på tryckpulserna för de fyra givarna återges i figur 8, där den fjärde av totalt 11 sparade cykler visas. Kurvorna i denna figur visar hur en tryckpuls passerade de fyra tryckgivarna. Pulsen nådde först givare p3, därefter p1, p4 och slutligen p2. Eftersom tryckgivarna var placerade i den ordningen (se figur 7), visar detta att tryckpulsen rörde sig nedströms (i detta fall från vänster till höger i motorn). Detta är inte självklart – vid själva övergången till en detonation bildas ofta en *retonationsvåg* [5], vilken i stället utbreder sig uppströms. Från kurvorna i figuren är det möjligt att identifiera en ökande stötstyrka när stötvågen utbreder sig nedströms (eftersom storleken på den första, monotona, ökningen över givarna ökar), något som även är förknippat med en ökande hastighet på stötvågen.

Från tryckkurvorna är det möjligt att uppskatta frontens hastigheten mellan givarna. Förutom hastigheten noteras även den maximala tryckuppgången, dvs. skillnaden mellan det högsta tryck som uppmättes och trycket precis innan fronten anlände till den aktuella givaren. Detta gjordes för de fyra givarna och för samtliga uppmätta pulser. Dessa data är redovisade i tabell 2. För nästan



Figur 8: Fjärde pulsen för det tredje experimentet den tredje juli.

Pulsnummer												Medel- värde
#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Maximal tryckuppgång vid de olika mätpunkterna (MPa)												
9	0.41	0.39	0.37	0.38	0.38	0.34	0.42	0.34	0.30	0.42	0.39	0.38
10	0.41	0.41	0.35	0.40	0.41	0.33	0.42	0.39	0.30	0.44	0.42	0.39
11	0.41	0.42	0.36	0.47	0.43	0.36	0.42	0.43	0.31	0.41	0.45	0.41
12	0.48	0.47	0.42	0.53	0.48	0.36	0.49	0.48	0.34	0.49	0.51	0.46
Stötvågens hastighet mellan mätpunkterna (m/s)												
10-9	730	680	660	750	700	700	760	710	700	670	750	710
11-10	740	710	710	770	730	720	770	710	720	690	740	730
12-11	780	730	740	790	740	730	790	730	740	750	790	760

Tabell 2: Tryckuppgång och hastighetsuppskattningar för det tredje experimentet den tredje juli.

samtliga pulser kan en ökning – både av tryckuppgång och av hastighet – noteras när fronten rör sig nedströms. Tabellen visar även att hastigheten på stöten mellan givarna för den fjärde pulsen – den plottad i figur 8 – ökar från 750 till 770 och slutligen 790 m/s mellan de fyra givarna, i överensstämmelse med den ökande stötstyrkan som tidigare identifieras från kurvorna i figuren.

3.3 Experiment fjärde juli 2003

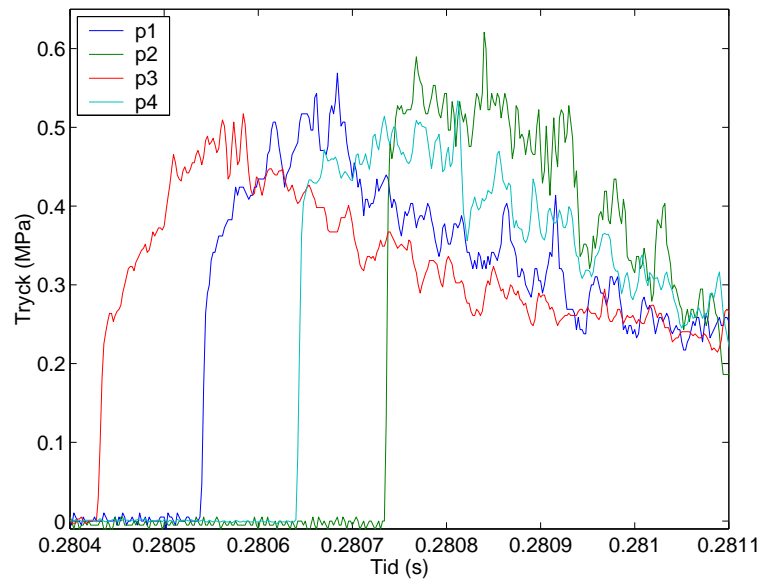
Eftersom blandningstalet påverkas av renblåsningsluften (vilken – som påpekats ovan – sprutas in kontinuerligt och alltså även *under* fyllnads- och tändningsfaserna) gjordes ett försök att kompensera för detta. Som tidigare nämnts har den extra renblåsningsluften mätts upp till 8.7 g/s. Denna extra luft medför naturligtvis att blandningen blir magrare. Hur mycket magrare är av flera anledningar svårt att bestämma:

- Eftersom renblåsningsluften sprutas in under hela cykeln kommer blandningen att bli magrare ju längre tid som går från det att ventilerna för vätgas/luftinsprutningen stängs tills dess att blandningen antänds.
- Då renblåsningsluften sprutas in från motorns främre vägg kommer inte blandningen att vara homogen i motorn. Den kommer istället att vara magrast i anslutning till insprutningen av renblåsningsluften, något som är ogynnsamt eftersom även tändstiften finns i den delen av motorn.

I extremfallet med “tillräckligt” lång tid mellan stängningen av insprutningsventilerna och tändningen av tändstiftet leder detta till att blandningen i anslutning till tändstiftet inte kommer att innehålla någon vätgas och därmed att antändning av blandningen omöjliggörs.

Även om blandningen runt tändstiftet innehåller vätgas så leder en magrare blandning till att den initiala stötvågen som bildas blir svagare och att hastigheten på den flamma som bildas blir långsammare – något som naturligtvis inverkar negativt på bildandet av en detonation. Dessutom – speciellt om den ursprungliga flammen är långsam – kan renblåsningsluften försvåra flammans vidare utbredning efter antändningen (och i värsta fall “blåsa ut” den).

Då blandningskammaren har en tämligen stor volym kan det antas att luftflödet uppströms om denna är konstant, trots att flödet genom ventilerna in i motorn inte är kontinuerligt. Flödet på den luft som blandas med vätgasen i blandningskammaren och som senare sprutas in i motorn, kan därför uppskattas genom tryck- och temperaturmätningar vid strypflänsen belägen uppströms om blandningskammaren. Detta innebär dock att det faktiska flödet genom ventilerna under den tid de är öppna är större än flödet genom mätpunkten. Om det för enkelhets skull antas att ventilerna är helt öppna under en tredjedel av varvet kommer flödet genom ventilerna under den tid de är öppna att vara tre gånger större än det som mätts upp i mätsektionen uppströms. Om det vidare antas att endast den renblåsningsluft som sprutas in under den tid bränsle/luftblandningen sprutas in påverkar blandningstalet ska luftflödet minskas med $a/3$ där a är massflödet renblåsningsluft. Som nämnts ovan är det svårt att uppskatta blandningstalet, speciellt då blandningen inte heller kommer att vara homogen. I ett första försök till kompensering för den extra renblåsningsluften minskades flödet från den ordinarie luftförsörjningen med hälften av renblåsningsflödet, dvs., med $8.7/2 = 4.35$ g/s. Denna compensation leder till att blandningstalet på den blandning som sprutas in i motorn ökar något och $\Phi = 1.1$ mättes upp. Motorns frekvens var i detta fall strax över 10, varför fyllnadsgraden var något reducerad (den uppskattades till ungefär 1.8).



Figur 9: Fjärde pulsen för det första experimentet den fjärde juli.

Resultatet från en av pulserna från detta experiment – även denna gång den fjärde pulsen – återges i figur 9. Jämförs kurvorna i denna figur med de i figur 8 kan större tryckökningar direkt identifieras i detta fall. Från tabell 3 – där den maximala tryckuppgången och frontens hastighet finns tabulerade – kan även en större hastighet mellan de två sista givarna noteras (870 m/s i stället för 790 m/s) för den fjärde uppmätta pulsen. Generellt visar tabellerna att både den största tryckstegringen och att den högsta hastigheten har ökat. Utan kompensering för renblåsningsluften uppmättes – för de elva pulser som sparades – en maximal tryckökning på 0.53 MPa och en största hastighet på 790 m/s. Efter kompenseringen var motsvarande siffror 0.62 MPa och 870 m/s.

Renblåsningen har nackdelen att den motverkar de positiva effekter på initieringen av detonationen som de numeriska simuleringarna beskrivna i [3] och [4] har demonstrerat. En annan metod att förhindra baktändning – utan denna nackdel – skulle kunna vara att använda en mindre reaktiv blandning. Detta kan uppnås genom att använda ett mindre känsligt bränsle, t.ex. propan, men det kan också uppnås genom att göra blandningen magrare (eller fetare) än den approximativt stökiometriska blandning som sprutats in genom ventilerna i de ovan beskrivna försöken.

Vätgas/luftblandningen ställdes in på blandningstalet $\Phi = 0.70$ och försöket upprepades. Motorn startades med renblåsningen påslagen och arbetade med frekvensen 9.6 Hz och med en fyllnadsgrad om 2.0. Även denna gång opererade motorn i pulserande drift. Massflödet av renblåsningsluften minskades gradvis under experimentets gång och när matartrycket på renblåsningsluften minskats från 1.5 till 0.5 MPa baktände motorn och membranet brast åter igen. Vid det tidigare försöket när renblåsningen gradvis stängdes av under gång (tredje försöket den tredje juli) noterades ej det tryck då motorn baktände, varför det inte går att avgöra om någon förbättring uppnåts. Data sparades före flödet av renblåsningsluft reducerades. Dessa data visar lägre hastigheter och lägre tryck än i de två fall som tidigare redovisats (figurerna 8 och 9 samt tabellerna 2 och 3). Dessutom inträffade inte alltid den största tryckökningen hos den tryckgivare som var placerad längst bak i motorn, något som framgår i tabell 4. Till skillnad från de tidigare tabellerna anges inte någon

Pulsnummer											Medel-	
#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	värde
Maximal tryckuppgång vid de olika mätpunkterna (MPa)												
9	0.44	0.39	0.41	0.52	0.42	0.48	0.45	0.47	0.39	0.39	0.49	0.44
10	0.45	0.39	0.44	0.57	0.44	0.48	0.44	0.46	0.40	0.41	0.49	0.45
11	0.45	0.40	0.42	0.53	0.43	0.46	0.43	0.44	0.41	0.44	0.50	0.45
12	0.49	0.47	0.48	0.62	0.48	0.54	0.48	0.52	0.45	0.47	0.55	0.50
Stötvågens hastighet mellan mätpunkterna (m/s)												
10-9	760	770	780	730	780	790	830	840	760	760	770	780
11-10	780	820	800	790	770	780	860	840	790	760	820	800
12-11	810	820	820	870	800	840	860	830	780	790	840	820

Tabell 3: Tryckuppgång och hastighetsuppskattningar för det första experimentet den fjärde juli.

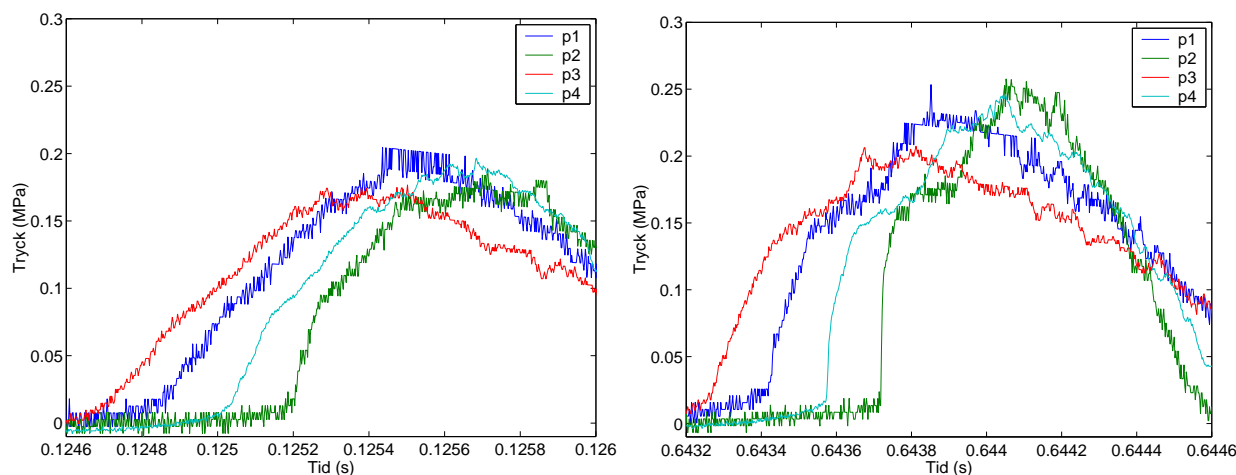
Pulsnummer											Medel-	
#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	värde	
Maximal tryckuppgång vid de olika mätpunkterna (MPa)												
9	0.22	0.20	0.19	0.18	0.20	0.21	0.23	0.18	0.21	0.18	0.20	
10	0.24	0.22	0.20	0.19	0.20	0.23	0.26	0.21	0.22	0.19	0.22	
11	0.24	0.22	0.18	0.19	0.20	0.21	0.26	0.22	0.21	0.19	0.21	
12	0.26	0.20	0.16	0.19	0.20	0.22	0.27	0.24	0.22	0.19	0.22	

Tabell 4: Tryckuppgång för det andra experimentet den fjärde juli.

uppskattad hastighet, vilket är en följd av att tryckstegringarna inte är lika markerade i detta fall vilket i sin tur gör det svårt att mäta upp en väldefinierad stöthastighet. Den högsta tryckökning som noterats för de pulser för vilka data sparats är runt 0.25 MPa och uppmättes i den sjunde pulsen. Trycksignalerna från denna puls, samt även den andra, är återgivna i figur 10. Från kurvorna i dessa bägge figurer kan endast en eller möjligen två stötvågor identifieras. I stället är tryckuppgångarna gradvisa och till vis del även överlappande, något som skulle kunna indikera att förbränningen i stället är initierad av de heta restgaser som finns i motorn när bränsle/luftblandningen sprutas in, eller av den flamma som bildas vid tändpunkten. Anledningen till denna försämring när blandningen blivit magrare skulle kunna vara att den stötvåg som bildades i anslutning till tändstiftet var svagare och därmed utbredd sig långsammare, varför förbränningen startade innan den hann fram till de aktuella givarpositionerna (i slutet av röret).

3.4 Experiment tjugosjunde augusti 2003

Vid det första försöket minskades tändvinkeln till 25°. Frekvens, fyllnadsgrad och blandningstal var ungefär desamma som de som användes vid det närmast föregående experimentet (andra skottet den fjärde juli). Även i detta fall var tryckuppgångarna mindre markerade än de för experiment 3 den tredje juli och experiment 1 den fjärde juli (vilka är de försök för vilka de största tryckstegringarna uppnåts). Endast de maximala tryckuppgångarna vid respektive givarposition är därför



Figur 10: Andra och sjunde pulsen för det andra experimentet den fjärde juli.

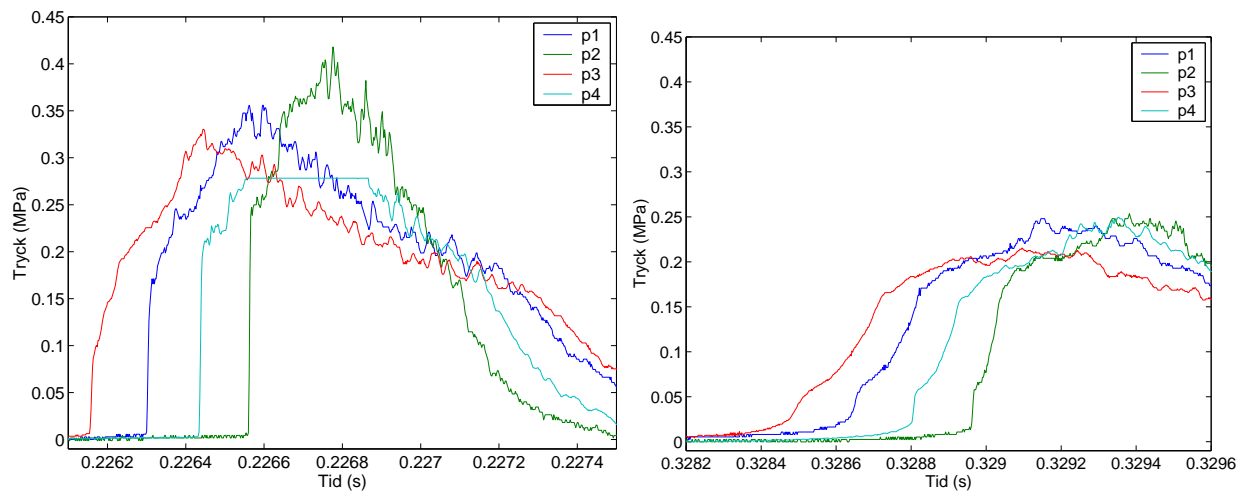
Pulsnummer											Medel-
#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	värde
Maximal tryckuppgång vid de olika mätpunkterna (MPa)											
9	0.26	0.26	0.33	0.22	0.26	0.24	0.28	0.25	0.24	0.27	0.26
10	0.27	0.29	0.36	0.25	0.27	0.26	0.34	0.26	0.25	0.28	0.28
11	0.27	>0.28	>0.28	0.25	0.27	0.25	>0.30	0.25	0.25	0.26	>0.27
12	0.29	0.31	0.42	0.25	0.29	0.26	0.40	0.27	0.27	0.28	0.30

Tabell 5: Tryckuppgång för det första experimentet den tjugosjunde augusti.

medtagna i tabell 5. Den tredje och den fjärde pulsens tryckkurvor visas i figur 11. I denna figur syns hur givare p4 (vid mätpunkt 11) bottnar. Mätningarna gjordes med 1.5 MPa matartryck på renblåsningssluffen. När detta minskades brast membranet vid ungefär 0.5 MPa och detta innan någon ytterligare mätning gjordes. Som synes från tabellerna 4 och 5 är tryckstegringarna som uppnåddes efter minskningen av tändvinkeln något högre. Detta kan förklaras av att den minskade tändfördröjningen medförde att blandningen som antändes blev mindre utspädd och att den negativa effekten av att låta renblåsningen strömma in i motorn kontinuerligt reducerats.

Vid försök nummer 2 minskades tändvinkeln till 1° , dessutom ökades blandningstalet från 0.68 till 0.76 och fyllnadsgraden minskades från 2.0 till 1.9. Blandningen var således något fetare, fyllnadsgraden något mindre och tändfördröjningen var mindre än vid det tidigare experimentet samma dag. Vid detta experiment samlades data in vid två tillfällen, ett då renblåsningssluffen matades med ett 1.5 MPa tryck och ett annat då det matades med 0.7 MPa. Resultaten är redovisade i tabell 6. En jämförelse med tabell 5 visar på något högre trycknivåer efter de aktuella ändringarna (dvs., något fetare blandning, något mindre fyllnadsgrad, samt en mindre tändvinkel). På samma sätt som tidigare kan denna relativa förbättring jämfört med det närmast föregående försöket förklaras både av att blandningen är fetare och av den ytterligare minskade tändfördröjningen.

De data som samlats in efter minskad renblåsning visar däremot på lägre tryckstegringar. Dessa data visar också att den minskade renblåsningen leder till att den högsta tryckstegringen inte upp-



Figur 11: Tredje och fjärde pulsen för det första experimentet den tjugosjunde augusti.

Pulsnummer											Medel- värde
#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Maximal tryckuppgång vid de olika mätpunkterna (MPa)											
Matartryck renblåsning 1.5 MPa											
9	0.34	0.36	0.38	0.34	0.35	0.32	0.33	0.39	0.31	0.31	0.34
10	0.35	0.45	0.38	0.37	0.34	0.32	0.34	0.40	0.32	0.32	0.36
11	0.34	0.40	0.36	0.35	0.32	0.32	0.31	0.37	0.30	0.30	0.34
12	0.42	0.50	0.44	0.45	0.41	0.39	0.37	0.46	0.37	0.36	0.42
Matartryck renblåsning 0.7 MPa											
9	0.16	0.21	0.22	0.19	0.20	0.14	0.16	0.20	0.19	0.16	0.18
10	0.18	0.23	0.24	0.21	0.22	0.17	0.17	0.24	0.21	0.17	0.20
11	0.13	0.19	0.20	0.18	0.19	0.11	0.13	0.20	0.18	0.14	0.16
12	0.12	0.20	0.22	0.18	0.16	0.10	0.13	0.18	0.18	0.10	0.16

Tabell 6: Tryckuppgång för det andra experimentet den tjugosjunde augusti.

Pulsnummer											Medel- värde
#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Maximal tryckuppgång vid de olika mätpunkterna (MPa)											
Första experimentet											
9	0.22	0.24	0.21	0.21	0.24	0.25	0.22	0.22	0.21	0.21	0.22
10	0.22	0.23	0.21	0.21	0.24	0.24	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
11	0.22	0.23	0.22	0.22	0.24	0.24	0.22	0.21	0.21	0.21	0.22
12	0.24	0.24	0.18	0.19	0.26	0.25	0.21	0.21	0.22	0.23	0.22
Andra experimentet											
9	0.17	0.13	0.17	0.16	0.15	0.18	0.13	0.20	0.16	0.18	0.16
10	0.18	0.14	0.17	0.16	0.15	0.17	0.13	0.20	0.17	0.19	0.17
11	0.17	0.13	0.17	0.15	0.15	0.16	0.12	0.19	0.16	0.17	0.16
12	0.19	0.13	0.15	0.14	0.14	0.15	0.11	0.21	0.16	0.17	0.16

Tabell 7: Tryckuppgång för första och andra experimentet den tjugotonde augusti.

nås vid den tryckgivare som är längst bak i motorn, dvs. den ökning av tryckstegringen som tidigare noterats då komplexet propagerar nedströms är frånvarande med det lägre matartryck på renblåsningsluften. En möjlig förklaring till detta är att den minskade renblåsningen gör att förbränningen över en större del av motorn ej sker i anslutning till stötvågen (något som måste inträffa om en övergång till detonation ska kunna äga rum). Detta kan bero på att den minskade hastigheten på renblåsningsluften leder till lägre turbulensnivåer i anslutning till tändpunkten vid motorns främre del vilket i sin tur leder till flammans som bildas vid tändstiftet accelererar långsammare.

3.5 Experiment tjugotonde augusti 2003

I dessa experiment användes något fetare blandning jämfört med försöken genomförda föregående dag; $\Phi = 0.91$ och $\Phi = 0.89$ i stället för $\Phi = 0.76$. I försök 2 var dessutom tändstiftet flyttat till position 2, dvs 12 cm från frontplattan. Tryckstegringarna för dessa bägge experiment återges i tabell 7. En jämförelse av dessa data med försök 2 den tjugosjunde augusti (redovisade i tabell 6, för samma tändvinkel och renblåsningsföde) visar att dessa förändringar – fetare blandning, något mindre fyllnadsgrad, något högre frekvens och ändrad placering av tändstiftet – resulterat i minskade tryckstegringar. I detta fall har en fetare blandning lett till en försämring av resultatet. Dock har andra parametrar ändrats, varför det är inte självklart att försämringen var orsakad av att blandningen var fetare.

Dessa försök kan också jämföras med försök 3 den tredje juli och försök 1 den fjärde juli (alltså de försök när de största tryckstegringarna noterats). Vid dessa bägge skott användes något fetare blandning, men också betydligt större tändförskjutning (50° i stället för 1°) och för dessa har betydligt större tryckstegringar mätts upp. Denna jämförelse indikerar att minskningen av tändförskjutningen skulle försämrat resultaten, vilket motsäger tolkningen av resultaten från försök 1 och 2 den tjugosjunde augusti, där en minskande tändvinkel medförde större tryckstegringar.

Pulsnummer											Medel-
#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	värde
Maximal tryckuppgång vid de olika mätpunkterna (MPa)											
Matartryck renblåsning 1.5 MPa											
9	0.34	0.37	0.41	0.38	0.38	0.37	0.35	0.36	0.37	0.41	0.37
10	0.38	0.41	0.41	0.40	0.41	0.36	0.38	0.38	0.38	0.39	0.39
11	0.39	0.42	0.38	0.41	0.39	0.39	0.36	0.39	0.40	0.39	0.39
12	0.40	0.42	0.44	0.44	0.40	0.40	0.37	0.42	0.41	0.46	0.42
Matartryck renblåsning 0.7 MPa											
9	0.19	0.22	0.22	0.23	0.19	0.22	0.23	0.23	0.22	0.22	0.22
10	0.23	0.25	0.24	0.26	0.22	0.25	0.25	0.25	0.24	0.25	0.24
11	0.21	0.22	0.22	0.24	0.20	0.23	0.24	0.25	0.21	0.25	0.23
12	0.20	0.23	0.22	0.24	0.19	0.24	0.24	0.25	0.21	0.24	0.23

Tabell 8: Tryckuppgång för det första experimentet den fjärde september.

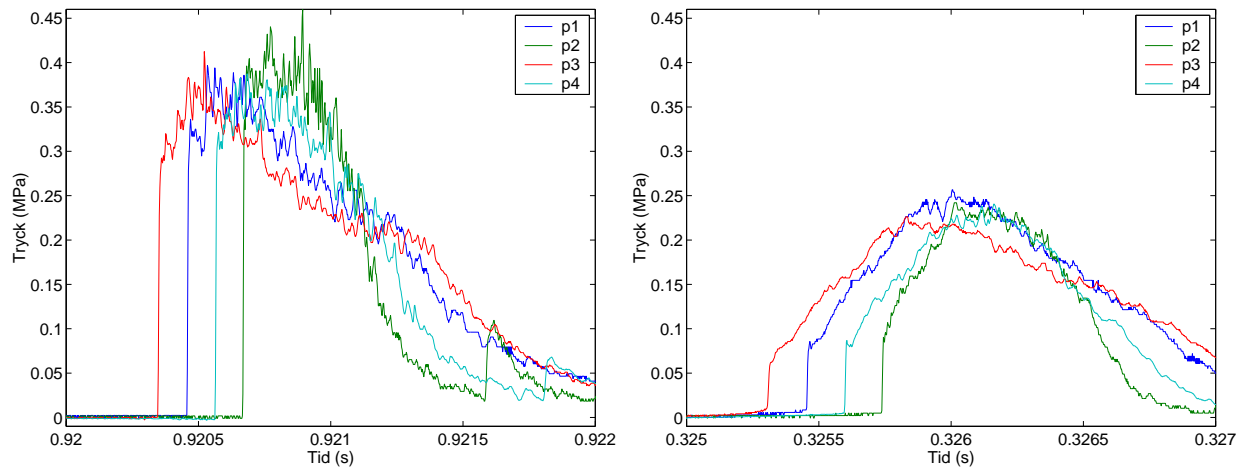
3.6 Experiment fjärde september 2003

De initiala flödesinställningarna var anpassade för att köra motorn i 20 Hz och eftersom inga anpassningar gjordes när frekvensen minskades till 10 Hz, har i de ovan redovisade försöken en fyllnadsgrad av ungefär två använts. I de försök som redovisas i detta avsnitt minskades fyllnadsgraden till ungefär ett.

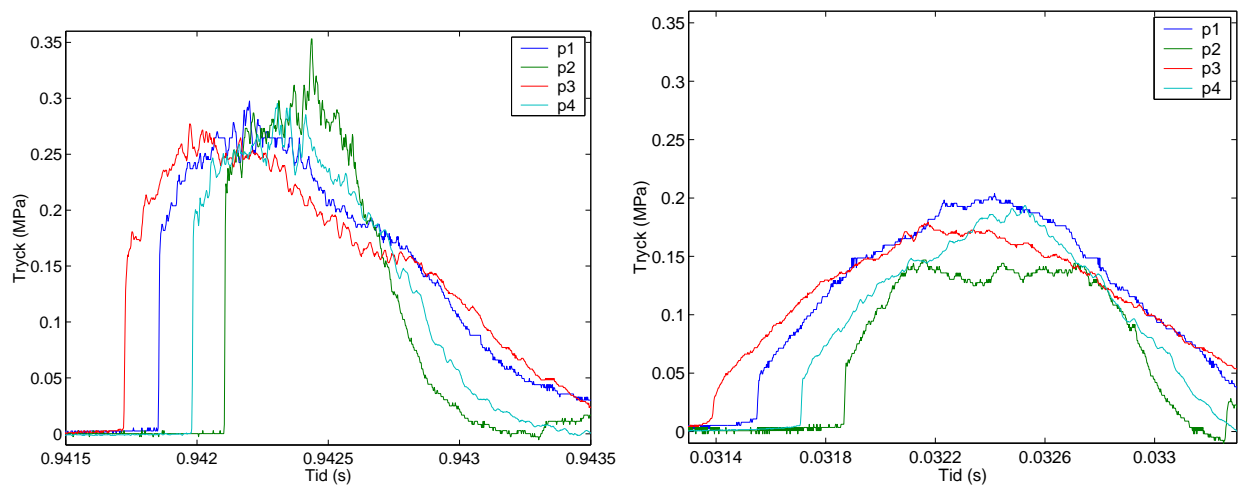
I det första försöket var fyllnadsgraden 1.2, blandningstalet var 1.1, tändvinkeln var 1° och mätningar genomfördes både med ett matartryck på renblåsningssluffen av 1.5 MPa och ett på 0.7 MPa. Resultaten redovisas i tabell 8. Med den kraftigare renblåsningen uppnåddes en största tryckstegring om 0.46 MPa och vid den lägre uppnåddes 0.26 MPa. Pulserna med de två största tryckstegringarna för respektive renblåsningstyrka visas i figur 12 (samma skala har använts i de bägge figurerna). Som synes var stötarna betydligt mindre kraftiga vid den lägre graden av renblåsning, dock var stötvågorna även här ganska markerade vilket skulle kunna indikera att ingen nämnvärd förbränning ägde rum innan stötvågens ankomst. Emellertid är dessa mätpunkter belägna i slutet av brännkammaren varför det är möjligt att vid mätpunkter närmare tändpunkten var förbränningen ej initierad av stötvågens ankomst. Skottet med den större renblåsningen kan även jämföras med försök 1 den fjärde juli, då en maximal tryckstegring av 0.62 MPa uppmättes. Vid detta försök användes samma blandningstal, men större fyllnadsgrad (1.8 i stället för 1.2) och större tändvinkel (50° i stället för 1°). Det är svårt att avgöra vilken förändring som orsakade försämringen, speciellt som en minskad tändvinkel tidigare visade sig vara positiv.

I det andra försöket minskades blandningstalet till 0.80 (och fyllnadsgraden var också något lägre, ca. 1.1). Tanken var att det lägre blandningstalet skulle göra blandningen mindre reaktiv, för att undvika en oönskad förbränning som på grund av de heta gaserna eventuellt skulle kunna inträffa innan den av tändpulsen genererade stötvågen antänder blandningen. Detta lyckas inte och i stället blev de uppmätta tryckstegringarna något mindre än vid det föregående skottet. Resultaten redovisas i tabell 9 och i figur 13 för en puls från respektive försök med de olika styrkorna på renblåsningen.

I det tredje försöket minskades blandningstalet ytterligare ($\Phi = 0.77$) och även fyllnadsgraden



Figur 12: Pulserna med de största tryckstegringarna för de olika renblåsningsstyrkorna för det första experimentet den fjärde september.



Figur 13: Pulserna med de största tryckstegringarna för de olika renblåsningsstyrkorna för det andra experimentet den fjärde september.

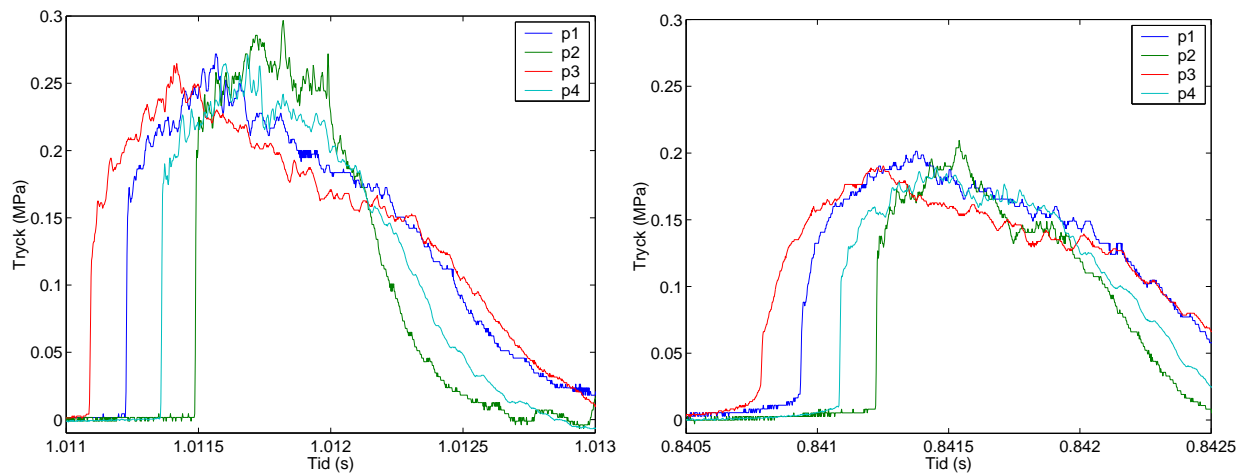
Pulsnummer											Medel-
#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	värde
Maximal tryckuppgång vid de olika mätpunkterna (MPa)											
Matartryck renblåsning 1.5 MPa											
9	0.33	0.31	0.26	0.29	0.31	0.31	0.31	0.32	0.32	0.28	0.30
10	0.32	0.33	0.25	0.30	0.32	0.31	0.32	0.32	0.30	0.30	0.31
11	0.30	0.32	0.26	0.30	0.34	0.30	0.31	0.32	0.30	0.30	0.30
12	0.35	0.33	0.28	0.32	0.33	0.33	0.34	0.33	0.32	0.35	0.33
Matartryck renblåsning 0.7 MPa											
9	0.18	0.15	0.17	0.16	0.17	0.15	0.16	0.15	0.17	0.16	0.16
10	0.20	0.18	0.20	0.19	0.20	0.16	0.19	0.17	0.20	0.19	0.19
11	0.19	0.16	0.18	0.17	0.18	0.15	0.17	0.15	0.18	0.18	0.17
12	0.15	0.14	0.15	0.13	0.13	0.13	0.14	0.11	0.15	0.15	0.14

Tabell 9: Tryckuppgång för det andra experimentet den fjärde september.

var något lägre, 1.0. Även i detta fall genomfördes två mätningar, men denna gång användes samma renblåsning vid båda tillfällena och i stället ökades frekvensen. Den maximala frekvens som uppnåddes var ca. 20 Hz. Vid den frekvensen baktände motorn och membranet brast. På grund av begränsade mätresurser kunde endast två mätningar göras, den första vid frekvensen 10 Hz och vid den andra mätningen är medelfrekvensen uppskattad till 11.29 Hz. Dessa experiment är redovisade i tabell 10 och i figur 14. Noterbart vid detta skott är att vid frekvensen 10 Hz var tryckstegringarna något lägre än vid de två tidigare försöken denna dag, vilket troligen beror på att blandningen var magrare i detta försök. Dessutom demonstrerar tryckkurvorna från mätningarna med den högre frekvensen ett likartat beteende som det som uppvisas när renblåsningen minskar, dvs. de är lägre och de är mindre skarpa. Detta skulle kunna förklaras med att vid den högre frekvensen minskar den "naturliga" tömningen av de heta restprodukterna genom rörets öppna ända och även vid de aktuella mätpunkterna (i slutet av röret) börjar bränsleblandningen reagera med restprodukterna innan stötvågen hinner fram.

4 Slutsatser/fortsatt arbete

Då endast ett fåtal experiment har genomförts går det ännu inte att avgöra hur effektiv denna motortyp är. Dessutom har mätningarna begränsats till att mäta trycket vid fyra punkter på motorns ena långsida. Detta är fullt tillräckligt när det gäller att avgöra om en detonation har bildats eller inte, däremot är det svårt att detaljerat säga något om förloppen i motorns inre. Dock har de experiment som hittills genomförts visat att särskilda åtgärder måste vidtagas för att förhindra att förbränningen fortplantas in i blandningskammaren. I de inledande experimenten löstes detta genom att utnyttja renblåsningluft för att åtminstone till viss del blåsa bort de heta restprodukterna – något som förutom att förhindra att förbränningen sprider sig till blandningskammaren även motverkar de positiva effekter som restprodukterna genom numeriska simuleringar visats ha vid initieringen av detonationen. Dessutom är renblåsningen påkopplad under motorns hela cykel, något som inte är optimalt och endast används för att det kräver ett minimum av förändringar av den befintliga



Figur 14: Pulserna med de största tryckstegringarna för de olika frekvenserna för det tredje experimentet den fjärde september.

Pulsnummer											Medel-
#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	värde
Maximal tryckuppgång vid de olika mätpunkterna (MPa)											
Matartryck renblåsning 1.5 MPa											
9	0.23	0.24	0.23	0.23	0.22	0.24	0.22	0.24	0.23	0.26	0.23
10	0.24	0.23	0.24	0.23	0.23	0.24	0.22	0.25	0.24	0.27	0.24
11	0.23	0.24	0.24	0.23	0.22	0.24	0.22	0.26	0.24	0.27	0.24
12	0.26	0.27	0.28	0.26	0.26	0.26	0.27	0.29	0.26	0.30	0.27
Samma matartryck renblåsning, men ökad frekvens											
9	0.22	0.19	0.21	0.18	0.18	0.20	0.19	0.20	0.21	0.19	0.20
10	0.23	0.21	0.23	0.19	0.20	0.24	0.20	0.21	0.22	0.20	0.21
11	0.22	0.21	0.22	0.18	0.18	0.22	0.19	0.19	0.21	0.19	0.20
12	0.23	0.21	0.22	0.17	0.19	0.23	0.20	0.20	0.24	0.21	0.21

Tabell 10: Tryckuppgång för det tredje experimentet den fjärde september.

konstruktionen. Vid några av de försök där motorn arbetar med pulserande förbränning – och där alltså renblåsning använts – ökar trycknivåerna när förbränningskomplexet propagerar i motorn men utan att uppnå de nivåer som är karaktäristiska för en detonation. Detta är inte förvånande, eftersom andra experiment, bl.a. vid Wright Pattersons Air Force Base, [6], visat att både turbulensgeneratorer och “Smirnov-kammare” (en kammare i anslutning till tändstiftet med en mindre öppning mot huvudbrännkammaren) underlättar övergången till detonation. Det finns sålunda två spår att följa vid det fortsatta arbetet med den aktuella motorn:

1. Modifiera motorn till att använda renblåsning på konventionellt sätt.
2. Fortsätta studier i syfte att utnyttja restprodukterna från en cykel för att underlätta initieringen av den följande.

Det första spåret har studerats vid flera forskningsanläggningar och åtminstone med vätgas som bränsle har principen demonstrerats framgångsrikt. Skall detta spår följas vid FOI/Grindsjön behöver motorn förutom ventilstyrd renblåsning troligen även kompletteras med både Smirnov-kammare och turbulensgeneratorer. Till skillnad från tidigare, i litteraturen redovisade, motorer har den aktuella konstruktionen dock den fördelen att insprutningen av bränsle/luftblandningen äger runt genom tolv ventiler placerade på motorns sida vilket resulterar i att motorn kan fyllas snabbare och därmed uppnå en högre maximal frekvens vilket i sin tur leder till större dragkraft. Däremot är det oklart hur initieringen av mer praktiska bränslen (t.ex. flygfotogen) ska lösas i en pulsdetonationsmotor av “konventionell” typ.

Motorer baserade på det andra spåret har ej demonstrerats, principen är ny och det finns förhoppningar om att den skall vara effektivare då praktiska, mer svår detonerbara bränslen används. Inget av de resultat som hittills framkommit har dock indikerat att principen fungerar, men eftersom endast vätgas hittills använts (vilket är en gas som är lätt att antända och förhållandevis enkelt att initiera en detonation i) är det ännu för tidigt att avfärda den. Ett antal förändringar är tänkbara i syfte att förhindra att förbränningen fortplantar sig in i blandningskammaren och därigenom förhindrar motorn att fungera:

- Använd magrare blandning än de som redan testats. Försök att hitta ett blandningstal på vätgas/luftblandningen med vilket motorn ej baktänder men som fortfarande går att tända med tändstift. Gör experiment där blandningstalet minskas – det minsta som använts hittills är $\Phi = 0.68$ – och en lämplig försöksserie vore $\Phi = 0.60, 0.50, 0.40, 0.30$. Genom att minska blandningstalet blir blandningen mindre känslig – men energiinnehållet minskas också – varför den eventuella detonationens egenskaper i den magrare blandningen också ändras. Bland annat kommer den att propagera långsammare samt ha ett lägre värden på tryck- och temperaturspikarna.
- Använd en annan bränslegas, t.ex. propan, vilken har egenskaper som liknar de för en aerosol av flygfotogen. Propan är både svårare att tända och genererar en flamma som propagerar långsammare än en flamma i vätgas/luft, något som bör kunna motverka tendensen till baktändning. Det är också betydligt svårare att initiera en detonation i propan och det är för bränslen med denna känslighet initieringsproblematiken ännu är olöst.
- Använd bränsle i vätskeform i stället för gasformigt bränsle. Genom att variera droppstorleken är det möjligt att förändra antändningsegenskaperna. Problematiken för propan är i än

högre grad gällande för de vätskeformiga bränslen vilka är lämpliga kandidater för att driva en pulsdetonationsmotor.

- Blanda bränslet och luften direkt i motorn istället för i blandningskammaren.
- Även i detta fall är det troligen fördelaktigt att använda Smirnov-kammare och turbulensgeneratorer.
- Applicera "flamstopp" på ventilerna för att förhindra att flamman propagerar in i blandningskammaren.

Erkännanden

Bengt Eiderfors, Mattias Elfsberg, Mats Johnsson och Bertil Sandberg har varit inblandade i olika delar av projektet och utan deras medverkan skulle denna rapport ej ha blivit till. Stort tack!

Referenser

- [1] Tegnér, J.K., 'Grundläggande principer vid design av fördetonator för pulsdetonationsmotorer', FOA-D-99-01362-310-SE, Dec 1999.
- [2] Bussing, T.R.A., and Pappas, G., 'An Introduction To Pulse Detonation Engines', *AIAA 94-0263*, (1994).
- [3] Jon Tegnér & Björn Sjögren, 'Numerical Investigations of Deflagration to Detonation Transitions', *Combustion Science and Technology*, vol. 174, no. 8, 153-186, 2002.
- [4] Jon Tegnér, 'Effects of Radicals on Initiations of Detonations in a Pulse Detonation Engine', FOI-R-0759-SE, December 200, ISSN 1650-1942.
- [5] Oppenheim, A. K., Manson, N., and Wagner, H. Gg., 'Recent Progress in Detonation Research', *AIAA Journal*, vol. 1, nr. 10, 2243-2252, (1963).
- [6] Schauer, F., Stutrud, J., and Bradley, R., 'AFRL's in-house research Pulse Detonation Engine', invited paper at 11th PERC Symposium, The Pennsylvania State University, University Park, PA, 18-19 November (1999).