

Jon Tegnér, Stefan Olsson, Mattias Elfsberg

Pulsdetonationsmotorn-Verksamhet under 2004

TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Vapen och skydd
147 25 Tumba

FOI-R--1377--SE

December 2004

ISSN 1650-1942

Teknisk rapport

Jon Tegnér, Stefan Olsson, Mattias Elfsberg

Pulsdetonationsmotorn-Verksamhet under 2004

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1377--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning och skydd	
	Månad, år December 2004	Projektnummer E 2006
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Jon Tegnér Stefan Olsson Mattias Elfsberg	Projektledare Bengt Eiderfors	
	Godkänd av Torgny Carlsson	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Pulsdetonationsmotor-Verksamhet under 2004		
Sammanfattning (högst 200 ord) I denna rapport redovisas resultaten från körningar med en pulsdetonationsmotor i kontinuerlig drift. Ett driftläge identifierades där bränsleluftblandningen detonerar under i stort sett varje puls. Till skillnad från vad som är brukligt i denna typ av motorer sprutas bränsle/luftblandningen in genom ett antal ventiler längs motorns ena sida, och för det driftläge där blandningen detonerade uppkommer detonationerna efter en "uppstartningstid" (ett fåtal sekunder). Orsaken till detta beteende är inte klarlagt, men det korrelerar väl med temperaturen i motorn. Ett system baserat på hastighetsuppskattningar av förbränningsfronten mellan olika stationer i motorns längsriktning användes för att avgöra om blandningen detonerade eller inte. Förbränningsfrontens ankomsttid vid de olika stationerna bestämdes genom att mäta ledningsförmågan mellan elektroderna på vanliga tändstift.		
Nyckelord Pulsdetonationsmotor		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 17 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--1377--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 5. Strike and protection	
	Month year December 2004	Project no. E 2006
	Subcategories 51 Weapons and Protection	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Jon Tegnér Stefan Olsson Mattias Elfsberg	Project manager Bengt Eiderfors	
	Approved by Torgny Carlsson	
	Sponsoring agency FM	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Puls Detonation Engine-activities during 2004		
Abstract (not more than 200 words) A pulse detonation engine were operated in continuous mode, and a state were identified where the media in almost all of the pulses detonated. In contrast to what is common, this engine utilizes injection of fuel/air through several ports along one side of the engine, and for the state were the media detonates there is a short "delay time" (a few seconds) before the pulses detonates. The reason for this behavior is not clear, but it correlates well with the temperature in the engine. A system using estimates of the speed of the combustion front between different positions along the side of the engine were used to determine whether the engine detonated or not. The conductivity between the electrodes on ordinary spark plugs were used to determine the arrival of the front to the different positions.		
Keywords Puls Detonation Engine		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 17 p.	
	Price acc. to pricelist	

Inledning

Pulsdetonationsmotorn (eller PDE från eng. Pulse Detonation Engine) finns beskriven i en mängd olika artiklar, t.ex. [1, 2]. Här behandlas därför endast det som skiljer motorn i denna studie från den typ som vanligen brukar användas.

Den viktigaste anledningen till att pulsdetonationsmotorn ännu inte används i praktiska tillämpningar är att det är "svårt" att initiera detonationen (detta gäller luftandande motorer). Atingen är initieringsenergin oacceptabelt hög eller också är övergångsprocessen från långsam förbränning till detonation inte tillräckligt snabb.

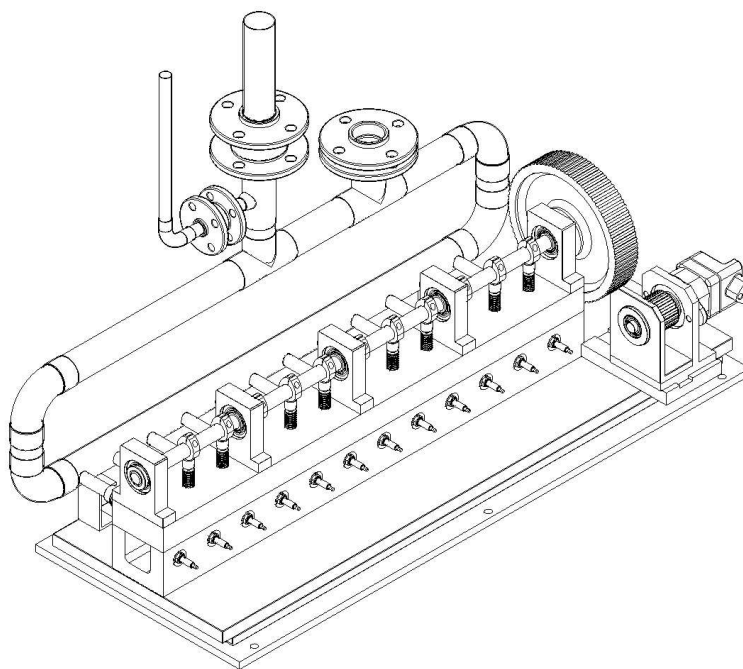
Numeriska simuleringar [3, 4] har visat att de radikaler som bildas under förbränningsprocessen – och som finns kvar i motorn efter det att övertrycket på frontplattan försvunnit (och då motorn är redo för nästa puls) – kan ha en gynnsam effekt då detonationen i den efterföljande pulsen ska initieras. De teoretiska modeller som är möjliga att använda för att studera dessa förlopp är oerhört komplexa, och förenklade modeller måste därför användas. Den allvarligaste förenklingen i metoderna beskrivna i [3, 4] är avsaknaden av modellering av omblandningsförloppet mellan det heta restprodukterna och bränslegaserna för den följande pulsen. Blandningen antogs i stället vara momentan, dvs. i den färdiga blandningen har massandelarna för de olika komponenterna inte förändrats under själva blandningsprocessen. Resultaten från dessa simuleringar ska därför betraktas med viss skepsis, och i första hand användas för att bestämma vilken typ av experiment som kan vara av intresse att genomföra. I denna rapport redovisas resultat från en motor som försöker utnyttja radikalerna från den föregående pulsen för att förenkla initieringen av detonationen i den följande. På grund av praktiska begränsningar kommer de idealiseringar som antagits vid simuleringarna inte att vara uppfyllda. Bl.a. gör tryckbegränsningar i blandningskammaren att blandningsprocessen i den "verkliga" motorn är långt ifrån momentan.

Beskrivning av experiment

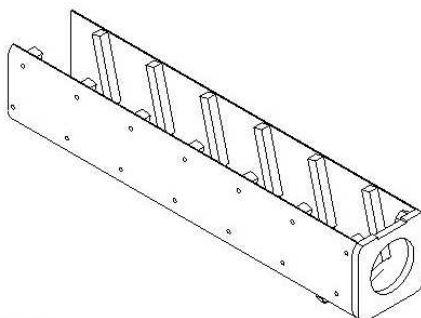
Motorn, och motivationen bakom dess design, har tidigare beskrivits i detalj i [5]. Här ges därför endast en kortfattad beskrivning. Motorn är 96 cm lång, har ett kvadratisk tvärsnitt om $6 \times 6 \text{ cm}^2$ och använder en färdigblandad blandning av vätgas och luft som bränsle. Denna blandning sprutas in genom en till tolv ventiler längs motorns övre del. Den första av dessa ventiler är placerad 4 cm från motorns framkant, och de resterande ventilerna är ekvidistant placerade med 8 cm avstånd (dvs. den sista ventilen är placerad 4 cm från motorns öppna ände). På motorns ena sida finns 12 st tryckgivarehåll och på dess andra sida 12 st tändstiftshåll. Tändstiftshållen kan användas för att tända blandningen, men också för att mäta ledningsförmågan och därmed användas för att detektera förbränningen. Dessa mätstationer är placerade på samma position i längsled som insprutningsventilerna. Ett tändstiftshåll finns också på motorns främre gavel. I figur 1 visas en bild av motorn med kringutrustning. För att skapa turbulens i strömningsfältet är motorn kompletterad med en 30 cm lång "turbulator" av stål, placerad 16 cm från motorns främre gavel (där tändstiftet är placerat), se figur 2. På den ände av turbulatorn som är riktad mot tändstiftet är en strypning placerad. Denna strypning ger upphov till en delvis avgränsad kammare – en "Smirnovkammare" – där ett högt tryck skapas när mediet förbränns (något som är fördelaktigt vid bildandet av detonationer). I den genomförda studien provades strypningar med öppningar av tre olika storlekar, 20, 25 och 30 mm, och i samtliga experiment tändes blandningen med ett tändstift på motorns främre gavel.

Tidigare har endast tryckgivare, av typen PCB 102A04 och 102A06, använts för att avgöra om detonationer bildas eller inte. Detta kan göras på två sätt:

1. Vid detonationer uppnås höga tryck. Beroende på bränsle, de tryckgivare som används



Figur 1: Motorn, med kringutrustning.



Figur 2: Turbulator.

och samplingsfrekvens uppmäts ofta toppvärden på över 20 bar (bränslet påverkar nivån på tryckspiken, och tryckgivare och samplingsfrekvens påverkar möjligheterna att mäta denna tryckspik).

2. Detonationshastigheten är för en stökiometrisk blandning av vätgas och luft strax under 2000 m/s. Om fler än två mätpunkter används är det möjligt att utnyttja skillnaderna i detonationens ankomsttid till de olika mätpunkterna och avståndet mellan dem för att uppskatta hastigheten.

På grund av den "svåra" miljö som råder i en pulsdetonationsmotor (höga temperaturer och snabba och stora variationer i trycket) är det inte ovanligt att tryckgivarna går sönder och ger otillförlitliga resultat. Av denna anledning kompletterades tryckgivarna i denna studie med tändstift, vilka användes för att mäta ledningsförmågan över elektroden. När en förbränning i någon form äger rum i anslutning till elektroden på tändstiftet ökar ledningsförmågan på grund av bildandet av elektriskt ledande radikaler (OH, H, O, etc). De genomförda experimenten har

visat att i de fall förbränningen äger rum i form av en detonation är ökningen i ledningsförmåga distinkt och lätt att detektera, och detonationens hastighet kan därmed uppskattas.

Motorn är även försedd med tre stycken termoelement för att mäta temperaturen. En mäter temperaturen utvändigt på motorn, och två stycken mäter temperaturen invändigt. De invändiga termoelementen är placerade i turbulatorn. Den första (givare 1) är placerad 20 cm från motorns frontgavel och den andra (givare 2) är placerad 44 cm från frontgaveln. Den utvändiga ger temperaturen hos motorn före försöket och de invändiga ger ett medelvärde av temperaturen hos gaser och motorns innerväggar. De invändiga termoelementen ger inga kvantitativa värden men väl kvalitativa, dvs. det går inte att avläsa någon verklig temperatur hos motorn eller gaserna men gör det möjligt att jämföra försök med varandra.

Ett mätsystem som klarar högre samplingsfrekvenser inköptes under året, men då detta system ännu inte fungerar tillfredsställande (systemet missar samplingstillfällena) så har det inte utnyttjats vid de experiment som beskrivs nedan. Det system som i stället användes var en Nicolet Vision, 16 kanaler med 16 bitar, med 100 kHz samplingsfrekvens. Denna frekvens är lägre än vad som är önskvärt för behandlandet av så snabba förlopp som de detonationer som är av intresse i detta projekt. Antag t.ex. att den korrekta hastigheten är v och den uppskattade hastigheten betecknas med $\tilde{v}$ så gäller följande samband mellan dessa båda hastigheter:

$$\frac{v}{1 + t_{\epsilon} \frac{v}{L}} \leq \tilde{v} \leq \frac{v}{1 - t_{\epsilon} \frac{v}{L}}.$$

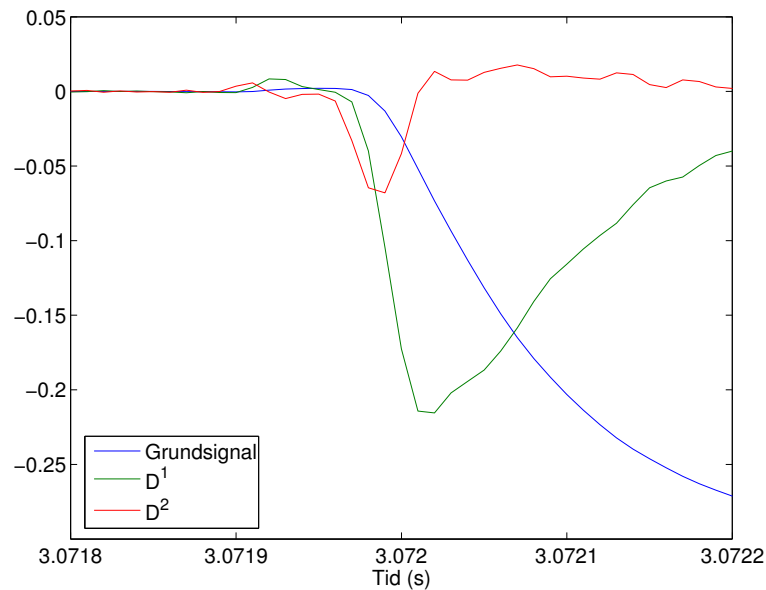
Här är L avståndet mellan mätstationerna som används vid uppskattningen av hastigheten, och t_{ϵ} inversen av samplingsfrekvensen (dvs. tidsskillnaden mellan två på varandra följande samplingstillfällen). Om det antas att $L = 8$ cm (det minsta avstånd som används, uppskattningarna blir bättre för större avstånd), kan följande tabell (baserad på den aktuella samplingsfrekvensen) skapas:

Korrekt hastighet (m/s)	Uppskattad hastighet (m/s)
800	$730 \leq \tilde{v} \leq 890$
1000	$890 \leq \tilde{v} \leq 1140$
1200	$1040 \leq \tilde{v} \leq 1410$
1400	$1190 \leq \tilde{v} \leq 1700$
1600	$1330 \leq \tilde{v} \leq 2000$
1800	$1470 \leq \tilde{v} \leq 2320$
2000	$1600 \leq \tilde{v} \leq 2670$
2200	$1730 \leq \tilde{v} \leq 3030$

Från denna tabell inses att det är önskvärt med en högre samplingsfrekvens. T.ex., om den uppskattade hastigheten är 1700 m/s ger tabellen att den korrekta hastigheten ligger mellan 1400 och 2200 m/s.

På grund av den stora (även om den är för låg i förhållande till de studerade förloppen) samplingshastigheten skapas stora datamängder även för det förhållandevis korta körtider som användes vid den aktuella studien (max 30 s). Det är *mycket* opraktiskt att analysera dessa datamängder manuellt (även om det i vissa fall kan vara lärorikt att göra detta för en delmängd av all data). På grund av trycksignalernas osäkerhet (se ovan) används i första hand signalerna från tändstiftsgivarna för att detektera om förbränningen ägt rum i detonationsform eller inte för de olika pulserna. Som nämnts ovan är detta baserat på uppskattningar av frontens hastighet mellan de olika mätstationerna. På grund av den i förhållande till detonationens höga hastighet låga samplingsfrekvensen råder en viss osäkerhet huruvida blandningen detonerat eller inte (se tabellen rörande korrekt och uppskattad detonationshastighet ovan).

Systemet mäter spänningsfallet över ett förspänt tändstiftsgap, och när ledningsförmågan mellan elektroderna i tändstiftsgapet ökar minskar spänningsfallet (över tändstiftsgapet). För



Figur 3: Signal från det förspända tändstiftsgapet. Orginalsignal, samt en och två gånger differentierad.

att detektera frontens ankomsttid måste alltså tidpunkten när signalen börjar avta detekteras. Det är enklare att göra en algoritm för detta om signalen först differentieras och sedan bestämma tidpunkten för minvärdet av den differentierade signalen. Om signalen differentieras en gång hittas på detta sätt den maximala lutningen av signalen från tändstiftet, och om signalen differentieras två gånger hittas i stället den tidpunkt där lutningen förändras som snabbast. I figur 3 illustreras signalen från ett av tändstiften, i grundform samt en och två gånger differentierad (för att lättare kunna jämföra de olika signalerna är orginalsignalen förskjuten till 0-nivå). Båda dessa metoder duger för att detektera detonationens ankomsttid (speciellt med tanke på den "låga" samplingsfrekvensen som användes vid försöken), men eftersom den två gånger differentierade signalen ger en ankomsttid som ligger före den som erhålls för den en gång differentierade signalen var det denna som användes för hastighetsuppskattningarna i denna rapport. I fall där gasblandningen inte detonerar och när motorn blivit "varm" äger förbränningen ibland inte rum i form av en väldefinierad front (deflagration). I dessa fall kan algoritmen för att analysera data ge upphov till både väldigt låga och väldigt höga hastighetsuppskattningar (båda "felaktiga" eftersom ingen frontpassage finns att detektera). Dessa punkter är inte exkluderade ur de bilder som redovisas nedan, men i syfte att göra figurerna lättare att tolka har hastigheter större än 2999 (m/s) justerats ned till denna hastighet.

Algoritmen för att hitta frontpassagerna och uppskatta hastigheterna är skriven i matlab och består av följande moment:

- Signalerna från de olika mätstationerna differentieras två gånger (central, andra ordningens noggrannhet).
- Det första minvärdet detekteras för varje signal. Här används ett tröskelvärde, dvs. endast minvärden mindre än ett givet värde används. Detta görs för att exkludera värden som en följd av brus i signalerna. Tidpunkten för frontens ankomsttid till respektive mätstation lagras i en matris.
- För de signaler där inget minvärde hittades sätts frontens ankomsttiden till 0 på relevant plats i matrisen. Detta används senare i rutinen när hastigheten ska uppskattas. De mät-

stationer där ankomsttiden är satta till 0 exkluderats och i stället används den närmast liggande mätstationen (om inte den också är satt till 0).

- Hastigheterna mellan de olika mätstationerna beräknas genom att dividera avståndet mellan de mätstationer för vilka ankomsttiden är skild från 0 med skillnaden i ankomsttid för motsvarande mätstationer.
- På grund av otydliga signaler eller av att förbränningen inte äger rum i form av en väldefinierad front (eller en front som rör sig åt “fel” håll) kan både negativa och “oändliga” hastigheter uppkomma. För att göra hastighetskurvorna enklare att utvärdera exkluderats negativa hastigheter, och hastigheter större än ett visst värde begränsas.
- För varje puls beräknas som mest de tre största hastigheterna (om fyra eller fler ankomsttider hittades). De uppskattade hastigheterna i varje puls ritas sedan som funktion av den lägsta ankomsttiden i varje puls.

De uppskattade hastigheterna jämfördes sedan med den förväntade hastigheten för en detonation i den aktuella blandningen. I denna rapport redovisas resultat för experiment med blandningar av vätgas/luft med blandningstalen 1 och 0.8, och för dessa bägge ekvivalenstal är detonationshastigheterna 1970 ($\Phi = 1.0$) och 1860 m/s ($\Phi = 0.8$).

För att relatera flödet till det regulatortryck som används på renblåsningsluften gjordes flödesmätningar för fem olika regulatortryck. Dessa mätningar resulterade i följande tabell:

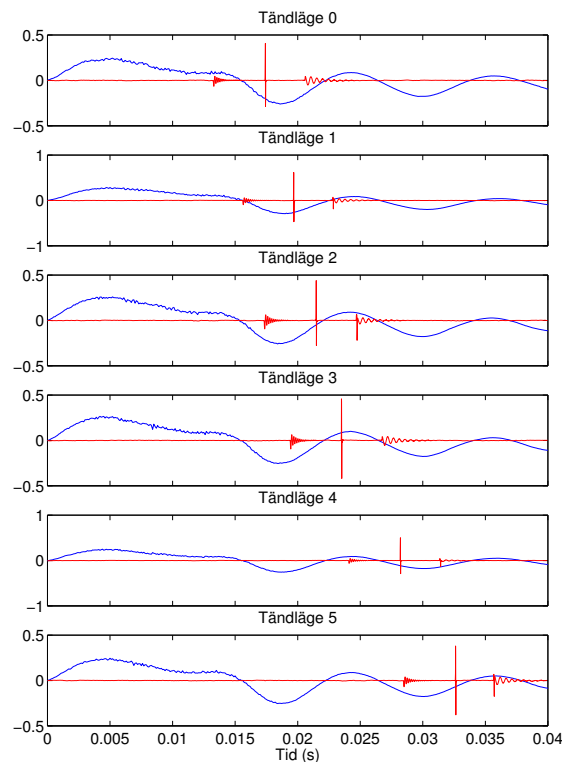
Regulatortryck (bar)	Temp (°C)	Flöde (m ³ /h)
3	18.0	8.5
5	17.9	14.5
7	17.9	21
10	18.0	29.5
15	18.0	44

Dessa data bekräftar att det råder ett linjärt samband mellan regulatortryck och renblåsningsflöde. Det regulatortryck som användes vid dessa mätningar ställdes in när flödet var avstängt. Vid experimenten nedan ställdes regulatören in med flödet på, varför det faktiska luftflödet skiljer sig med några procent från det i tabellen ovan.

En av de många parametrar som kan varieras är tändfördröjningen; tiden mellan stängning av insprutningsventilerna och tändningen av gasblandningen. Denna tid är betydelsefull ur åtminstone två aspekter:

- En av idéerna bakom motorprincipen som testas i den aktuella uppställningen är att utnyttja radikaler från den föregående pulsen när detonationen i den följande pulsen ska startas. Av denna anledning är “residenstiden” – den tid som bränslegaserna är exponerade för de heta restprodukterna – kritisk. Om residenstiden är för lång är risken stor för spontantändning.
- När bränslegaserna sprutas in i motorn bildas tryck- och förtunningsvågor som reflekteras både från motorns öppna ända och från frontplattan. Skillnaden i tryck som detta ger upphov till i anslutning till tändstiftet har tidigare visats ha betydelse för motorns effektivitet.

För att undersöka den andra punkten ovan uppmättes trycket vid frontplattan och trycksignalen från denna mätning jämfördes med tidpunkten för tändningen. I denna mätning användes inte vätgas (den tryckgivare som användes vid detta moment håller inte för de höga tryck som bildas vid detonationer), för att till viss del kompensera för detta modifierades luftflödet så att det totala



Figur 4: Tryckpulser (blå kurva, med enheten bar) och tändsignal (röd kurva) för olika tändvinklar vid motorfrekvensen 20 Hz. Tidpunkten för tändningen detekteras av det största utslaget (i den röda kurvan).

volymflödet blir identiskt med det som råder när vätgasen är påkopplad (detta tar *inte* hänsyn till den förändrade ljudhastighet som råder när vätgasen är bortkopplad). Sex olika tändvinklar undersöktes, och i tabellen nedan definieras de olika tändlägena, samt visas hur tändvinkeln relateras till tändfördröjningen då motorn arbetar i 20 Hz (för andra motorfrekvenser kommer tändfördröjningarna att vara annorlunda). Tändvinkeln är definierad som axelns rotation från läget då insprutningsventilen stänger.

Tändläge					
0	1	2	3	4	5
Tändvinkel (°)					
5	20	33	45	75	108
Tändfördröjning vid 20 Hz (ms)					
0.7	2.8	4.6	6.2	10.4	15.0

Tändläge 0 är den minsta tändvinkel som kan användas i motorn i dess nuvarande utformning, och som synes i tabellen ligger tändningen i detta fall ungefär 5° efter insprutningsventilernas stängning. I de fall renblåsning används måste tändningen aktiveras *innan* renblåsningssluften sprutas in, och detta begränsar den största tändfördröjning som kan användas. Här är detta tändläge benämnt tändläge 5.

I figur 4 illustreras hur tändningen relateras till trycket på frontplattan vid frekvensen 20 Hz. T.ex. aktiverades tändstiftet vid ett undertryck för tändläge 0 och 1, ungefär vid atmosfärstryck för tändläge 2 och vid ett förhöjt tryck för tändläge 3. För andra motorfrekvenser kommer de aktuella tändvinklarna att resultera i andra tändfördröjningar och annorlunda tryckhistorier än de redovisade i tabellen ovan och i figur 4.

Resultat

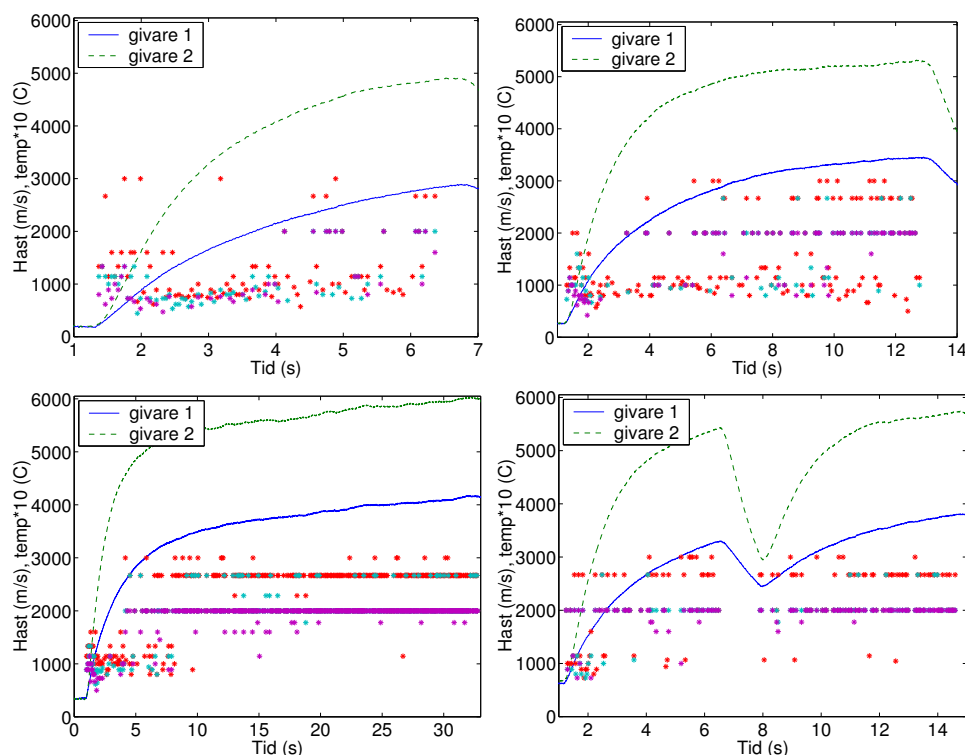
I denna sektion beskrivs de olika experiment som genomfördes, samt de viktigaste resultaten från dessa. De parametrar som varierades var följande:

- Ekvivalenstalet, Φ .
- Tändfördröjningen, tändläge 0 till tändläge 5 från tabellen ovan.
- Öppningen på strypningen in till Smirnovkammaren. Diametern på öppningen varierades mellan 20, 25 och 30 mm, dessa öppningar betecknas nedan öppning 1, 2 och 3.
- Flödet på renblåsningsluften. Här testades ingen renblåsning alls, samt regulatortryck på 3 och 5 bar.
- Tiden som motorn kördes.

Förutom dessa parametrar var inte heller motorns temperatur densamma vid början av varje skott. Detta är en följd av att motorn är okyld, och snabbt blir varm, vilket gör att det är svårt att systematiskt variera temperaturen. I försöken gjordes därför inga försök att styra temperaturen, och i stället noterades endast temperaturen vid försökets början.

I de experiment som redovisas i denna rapport användes i samtliga fall full fyllnadsgrad, motorfrekvensen var 20 Hz, insprutning av vätgas och luft skedde genom ventilerna vid position 2 till 5 och renblåsning genom ventil 1 (den ventil som är placerad längst upp till höger, närmast drivhjulet, i figur 1). Motorn tändes med ett tändstift placerat på motorns främre gavel. De resultat som framkommit vid de aktuella experimenten kan sammanfattas i följande punkter:

- Inte i något fall noterades fler än enstaka detonationer i början av försöket (under de första 50 pulserna).
- I takt med att motorns temperatur ökade, ökade också andelen detonationer. För vissa fall detonerade i det närmaste 100% av pulserna i slutet av körningen.
- Avbrott i tändningen ett fåtal sekunder påverkade inte andelen detonationer märkbart.
- Avstängning av vätgasen ett fåtal sekunder påverkade inte andelen detonationer i någon större utsträckning.
- För de fall där andelen detonationer var liten (eller obefintlig) var signalerna från tändstiften mer distinkta i början av experimentet än i slutet. Detta kunde speciellt noteras vid låga ekvivalenstal (i flera av dessa fall var dock signalen från givaren vid position 7 tydlig och distinkt).
- Storleken på öppningen på strypningen in till Smirnovkammaren påverkade inte andelen detonationer i någon större utsträckning för de fall som testades.
- I ett fall, $\Phi = 0.8$ och med renblåsningen avstängd, noterades spontandetonation (dvs. ej i anslutning till tändning av blandningen med tändstiftet). I övrigt noterades endast ett fåtal detonationer vid låga eller höga ekvivalenstal.
- Tändlägena 1 och 2 gav störst andel detonationer.



Figur 5: Temperaturer (givare 1 och givare 2) och hastighetsuppskattningar (*-markeringarna) från körningar av olika längd och med varierande begynnelsestemperatur i motorn.

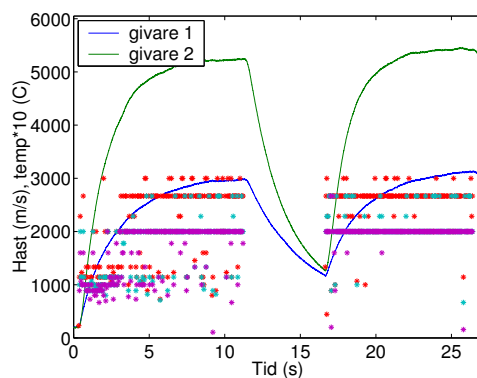
Resultaten från listan ovan illustreras nedan med resultat från några av de experiment som genomfördes under året.

I en försökserie (040628:1-4) varierades tiden på körningarna. Den tid som användes vid de olika körningarna och temperaturen i motorn när experimenten startade redovisas i tabellen nedan:

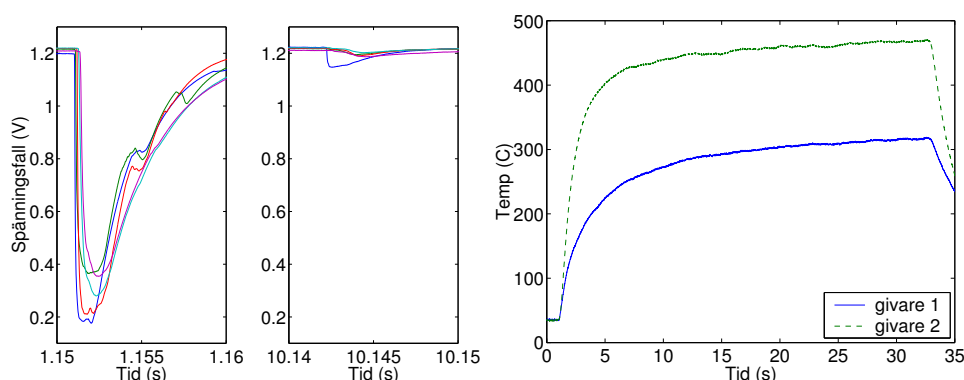
Körtid (s)	5	12	32	14
Experiment	040628:1	040628:2	040628:3	040628:4
Temperatur (°C)	22	25	30	47

I den sista av dessa körningen stängdes tändningen av ungefär en sekund i mitten av körningen. Förutom standardvärdena användes vid denna serie $\Phi = 1$, tändläge 1, renblåsningen var inställd på 5 bar och öppning 3 (30 mm diameter) användes. I figur 5 visas de tre största hastighetsuppskattningarna (i de fall signalerna från tändstiftsgivarna varit tydliga nog för att möjliggöra uppskattningar av tre hastigheter), samt temperaturen vid de två inre temperaturgivarna. Kurvorna i denna figur visar ett tydligt samband mellan temperaturen i motorn och andelen detonationer som bildas. I det fall där tändningen stängdes av uppvisades ingen nämnvärd skillnad i andelen av pulserna som resulterade i detonationer närmast innan och efter avbrottet (det kunde också noteras att den första pulsen efter avbrottet detonerade). Experimentet med den långa körtiden visar också att i detta fall bildades detonationer vid i stort sett samtliga pulser efter 10 sekunder. Från resultatet med avbrottet är det också tydligt att motorn började arbete med större andel detonationer tidigare om motorn var varm redan vid start (i det fallet var begynnelsestemperaturen 47 °C).

För att undvika att vätgas läcker ut i testcellen kopplas luften på, och motorns tändning startas, *innan* vätgasen kopplas på. Detta resulterar i att för de första pulserna är blandningen magrare än för de senare, när ett stabilt flöde har hunnit ställa in sig. För att isolera den effek-



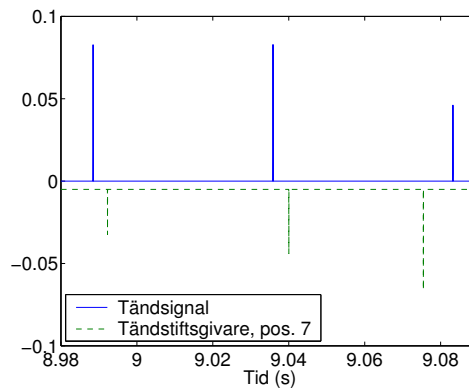
Figur 6: Effekten av avstängd vätgas under gång. Temperaturer i motorn (givare 1 och givare 2) samt hastighetsuppskattningar (*-markeringarna).



Figur 7: Spänningsfall över tändstiftsgapet vid två olika tidsintervall och temperaturer i motorn (givare 1 och givare 2) vid skott med $\Phi = 0.8$.

ten från det ovan illustrerade fenomenet att andelen detonationer ökar när motorn värms upp gjordes ett försök (041029:1) där vätgasen stängdes av fem sekunder mitt i försöket. I detta försök användes $\Phi = 1.0$, tändläge 2, renblåsningen var inställd på 5 bar och öppning 3 användes. Begynnelsestemperaturen i motorn var 21 °C och i figur 6 visas hastighetsuppskattningarna och temperaturkurvorna för detta försök. Figuren visar att andelen detonationer inte påverkas i någon större utsträckning av att vätgasen är avstängd under fem sekunder.

För låga ekvivalenstal bildades endast undantagsvis detonationer. Signalerna från tändstiftsgivarna för dessa körningar illustrerade att förbränningen endast kunde karakteriseras som en väldefinierad front i början av experimentet. I figur 7 (från 040628:6) visas signalerna från tändstiftsgivarna vid position 7 till 11 vid två olika tidsintervall, i början (den tredje pulsen) och en bit in i experimentet. Dessutom visas temperaturkurvorna från de två temperaturgivarna i motorns inre. Vid detta experiment var $\Phi = 0.8$, renblåsningen var inställd på 5 bar, öppning 3 och tändläge 1 användes. De bägge tidsintervallen är godtyckligt valda, men illustrerar en tydlig trend; i början av experimentet gav förbränningen upphov till en tydlig, och i tiden väldefinierad, ökning i ledningsförmågan vilket gjorde det möjligt att för dessa pulser uppskatta förbränningsfrontens hastighet. Efter kort tid (mindre än en sekund) minskade ökningen i ledningsförmåga, och det blev svårare att hitta en väldefinierad ankomsttid. Av de olika mätstationerna uppvisade signalerna från tändstiftsgivaren vid position 7 karaktären av väldefinierad förbränningsfront längre än de övriga, och det är också signalen från den givaren som är tydligast i figur 7b.



Figur 8:

Betydelsen av renblåsningen undersöktes genom att använda samma ekvivalenstal ($\Phi = 0.8$) och övriga inställningar som i försöket ovan, men med mindre renblåsning. I försök 040701:3 var renblåsningen inställd på 3 bar och i försök 040701:4 var renblåsningen helt bortkopplad. Även i dessa fall kunde en större ökning i ledningsförmåga, samt en tydligare "frontkaraktär" (med väldefinierad ankomsttid), noteras hos signalerna i början av de två experimenten.

Inte i något av dessa experiment med blandningstalet $\Phi = 0.8$ noterades tydliga detonationer över flera på varandra följande pulser. Däremot uppkom en "spontandetonation" vid den sista pulsen när renblåsningen var helt bortkopplad. För denna sista puls, efter strax under nio sekunder, kunde hastigheter uppskattas både från signalerna från tryckgivarna och från signalerna från tändstiftsgivarna. Dessa hastigheter redovisas i tabellen nedan:

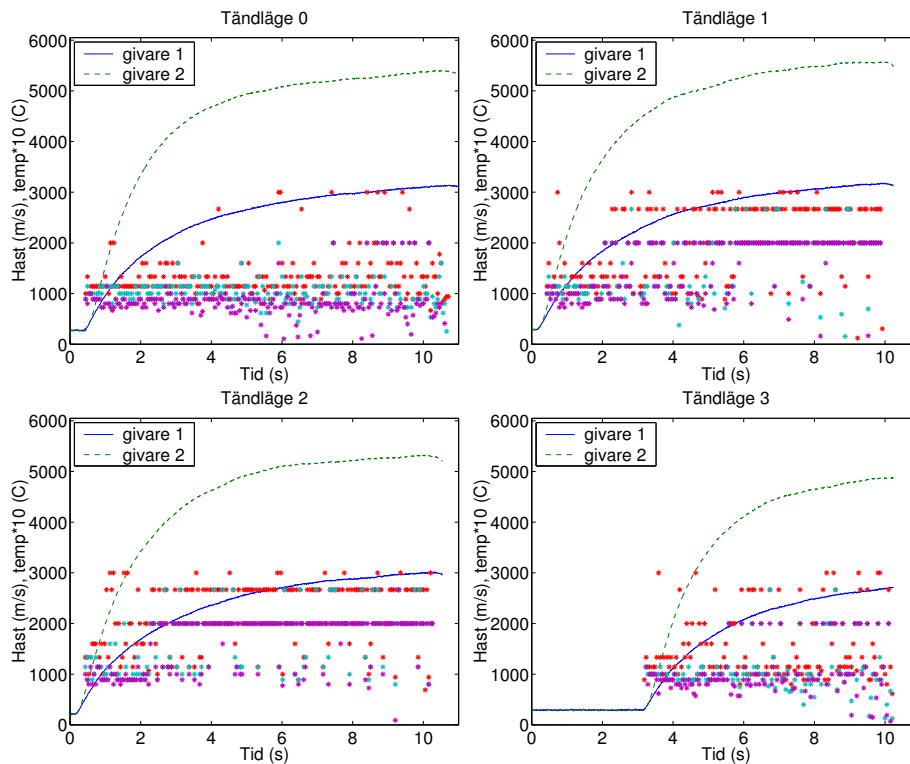
Tändstiftsgivare	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
Tryckgivare (m/s)	x	2000	1300	2000	
Tändstiftsgivare (m/s)	1100	2700	2000	1300	2000

Hastighetsuppskattningarna i tabellen ovan visar att blandningen detonerade över en stor del av motorn. Vid denna körning (040701:4) var motorns frekvens 21.11 Hz (dvs. tiden mellan tändpulserna var 0.0474 s). I figur 8 visas kurvor från tändsignalen och från tändstiftsgivaren vid position 7 för de två sista pulserna samt spontantändningen. Dessa signaler är "friserade" för att ta bort brus och för att enklare kunna tolkas. För de två första pulserna i figuren kan en tydlig fördröjning mellan tändningen och passagen av förbränningsfronten noteras. I den sista pulsen däremot är det tydligt att förbränningsfronten passerade position 7 innan tändningen aktiverades. Som nämnts ovan var det endast denna sista puls som detonerade, och i anslutning till denna puls baktände motorn.

En studie rörande tändlägets (i tiden) betydelse genomfördes också. Förutom standardvärdena kördes motorn med $\Phi = 1.0$, renblåsningen var inställd på 5 bar och öppning 3 användes. I figur 9 visas resultaten från körningar med tändläge 0 (041027:7), tändläge 1 (041027:3), tändläge 2 (041027:1) och tändläge 3 (041027:4). Såsom visats tidigare har även temperaturen i motorn stor betydelse, men eftersom motorn tar tid att kyla var det svårt att styra denna parameter, och begynnelsestemperaturen i motorn varierade därför för de olika tändlägena. Temperaturerna i början av de olika körningarna är angivna i följande tabell:

Tändläge	0	1	2	3
Experiment	041027:7	041027:3	041027:1	041027:4
Temperatur (°C)	27	29	21	29

Figur 9 visar att störst andel detonationer uppkom när tändläge 1 eller 2 användes (med tändläge 2 aningen bättre). Hastighetsuppskattningarna är baserade på signalerna från tändstiftsgivarna,

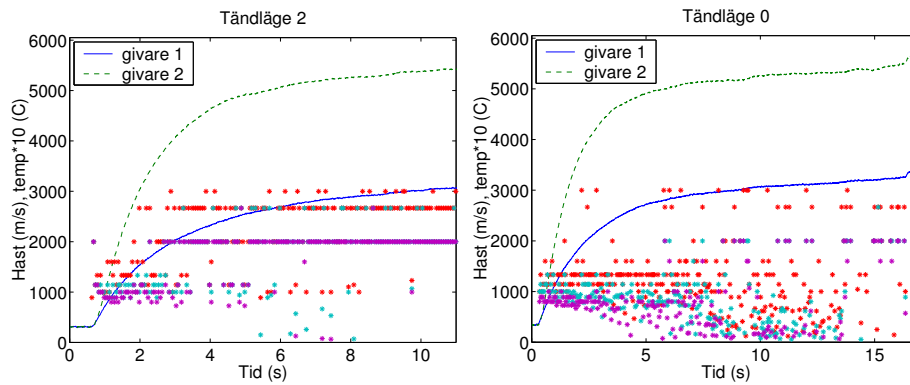


Figur 9: Temperaturer (givare 1 och givare 2) och hastighetsuppskattningar (*-markeringarna) från körningar med olika tändlägen.

och de väldigt låga hastigheter som redovisas för några av pulserna i figuren är inte en indikation på att fronten är så långsam utan betyder i stället att algoritmen som används för att uppskatta hastigheterna blir "förvirrad" när ingen väldefinierad förbränningsfront finns att detektera.

Förutom tändlägena 0-3 genomfördes ett försök vardera med tändläge 4 (041027:8) och 5 (041027:6). Med tändläge 4 baktände motorn efter en puls utan att detonationer bildats. Med tändläge 5 baktände motorn efter tre pulser och inte heller här kunde tydliga detonationer detekteras, däremot en "tveksam" mellan de två sista tändstiftsgivarna (position 11 och 12) i den första pulsen.

Ytterligare ett skott genomfördes med tändläge 2 (041027:5), denna gång var motorn 10 grader varmare än vid det ovan redovisade skottet (31 °C istället för 21 °C). Dessutom gjordes ett försök med den minsta tändfördröjningen, tändläge 0 (041029:2), under en längre tid än vid det tidigare försöket med samma tändläge. Begynnelsestemperaturen vid försöket med tändläge 0 var 7 grader högre än vid det tidigare försöket med samma tändläge (34 °C istället för 27 °C). Motivationen bakom dessa försök var i det första fallet att undersöka om den högre begynnelsetemperaturen påverkade förloppet, och i det andra fallet att undersöka om andelen detonationer ökade i takt med att motorn hettades upp. Resultaten från dessa båda försök illustreras i figur 10. Från bägge dessa figurer är det tydligt att temperaturen i motorn är betydelsefull. I fallet med tändläge 2 var andelen detonationer något större när motorn var varmare vid försökets början. När tändläge 0 användes visar också signalerna från tändstiftsgivarna att andelen detonationer ökade med tiden (och när temperaturen i motorn ökade), men inte till den grad som var fallet för tändläge 1 och 2. Figuren i detta fall indikerar även en stor andel låga hastigheter, men såsom noterats ovan är detta inte en följd av att förbränningsfrontens hastighet är så liten utan det är ett tecken på att förbränningen inte äger rum i form av en väldefinierad front (något som algoritmen som används för att uppskatta hastigheterna inte klarar att hantera). Detta försök avslutades med att motorn baktände.



Figur 10: Temperaturer och hastighetsuppskattningar från körningar med tändläge 2 och 0.

Diskussion och slutsatser

I en “konventionell” pulsdetonationsmotor sprutas bränsle/luftblandningen in genom en ventilt i motorns framkant, och detta görs efter det att restprodukterna från den föregående pulsen har avlägsnats genom att blåsa rent med luft. I den motor som studerats här sprutas bränsle/luftblandningen i stället in genom ett antal ventiler placerade på olika positioner i motorns längsriktning. Anledningen till detta är att försöka utnyttja radikalerna i restprodukterna från den föregående pulsen för att underlätta initieringen av detonationen i den följande pulsen, något som genom numeriska simuleringar visat sig kunna vara fördelaktigt, [3, 4]. Den motor som studerades utnyttjade ventiler som öppnas och stängs med hjälp av kamnockar på en vevaxel driven av en hydralmotor. Bränsle/luftblandningen som sprutas in i motorn förblandas i en blandningskammare. Detta system har två begränsningar: ventilerna börjar läcka vid ett övertryck av ungefär 2 bar, och insprutningstiden är given av motorns frekvens och formen pånockarna (dvs. för att förändra insprutningstiden för en given frekvens måste nyanockar tillverkas). Detta innebär att effekterna av variationer i insprutningshastighet och insprutningstid inte har kunnat studeras, faktorer som med stor sannolikhet påverkar motorns funktion.

De parametrar som studerades var ekvivalenstalet, tändfördröjningen, storleken på renblåsningensflödet samt tiden som motorn kördes. Resultaten från körningarna visade på ett tydligt samband mellan temperaturen i motorn, och andelen av pulserna som detonerade. I samtliga fall där stabila detonationer kunde verifieras inträffade dessa efter en viss “uppstartningstid”, och denna uppstartningstid kunde också visas vara en funktion av temperaturen i motorn när det aktuella försöket påbörjades. Dvs. om ett försök genomfördes i direkt anslutning till det föregående, och motorn därvid var varm redan vid start, resulterade detta i att uppstartningstiden minskade. Detta exemplifierades också med två försök där i det ena tändningen stängdes av någon sekund efter ungefär 7 sekunder och där tillförseln av vätgas stängdes av under 5 sekunder när motorn hade varit i drift i ungefär 10 sekunder i det andra. I inget av dessa fall påverkade avbrotten andelen detonationer i någon större utsträckning, något som talar emot hypotesen att det är radikalerna från den föregående pulsen som underlättar detonationen. På grund av turbulatorn och strypflänsen i den främre delen av motorn kan det dock inte uteslutas att det kan finnas områden, t.ex. i anslutning till någon av motorns turbulensgenererande delar, där blandningen innehåller förhöjda halter av radikaler även efter några sekunder utan förbränning. Dessutom har studier visat att temperaturen enbart inte nämnvärt påverkar detonationens cellstruktur, [6], och därmed inte heller mediets känslighet för initiering av detonationen. För att ytterligare studera detta är det nödvändigt att komplettera mätutrustningen med förmågan att detektera kvantiteten av en eller flera av de radikaler som bildas i förbränningsprocessen.

Försök gjordes med blandningstalet $\Phi = 0.8$. I detta fall detekterades endast ett fåtal deto-

nationer. Däremot visade signalerna från tändstiftsgivarna en tydlig påverkan av temperaturen i motorn. I början av försöket hade förbränningen en tydlig karaktär av en förbränningsfront som rörde sig bakåt i motorn. Men bara efter någon sekund minskade ökningen i ledningsförmåga, och det gick inte att definiera en väldefinierad ankomsttid (och därmed gick det inte heller att uppskatta någon hastighet). Det är inte klart vad detta beror på, men det skulle kunna vara en följd av att mediet börjar reagera i motorn mellan pulserna. För att studera detta är det igen nödvändigt att kunna detektera mängden av åtminstone en av de radikaler som bildas som en följd av reaktionen vid olika tidpunkter i pulsen och vid olika mätstationer.

För blandningstalet $\Phi = 0.8$ gjordes försök med minskande grad av renblåsning. I inget av fallen detekterades några stabila detonationer. Däremot, i det fall renblåsningen var helt avstängd, baktände motorn efter ungefär 9 sekunder. Men innan baktändningen kunde en detonation detekteras som rörde sig genom en stor del motorn. Dvs. denna detonation initierades *inte* av tändstiftet, utan blandningen hade blivit så känslig att någon liten störning i motorns främre del var tillräcklig för att initiera detonationen.

Exemplen ovan visar att temperaturen i motorn är betydelsefull, men som redan nämnts är det med den aktuella mätutrustningen inte möjligt att mäta mängden av radikaler i blandningen innan tändning i varje puls. Den viktigaste fortsättningen på denna studie är därför att komplettera mätsystemet så att det även är möjligt att detektera radikaler i strömningsfältet, t.ex. OH.

Studien har demonstrerat att det finns ett driftläge där motorn, efter en viss uppstartningstid, kan fås att arbeta med detonativ förbränning. Utgående från detta driftläge vore det ett naturligt steg att genomföra en parametervariation med syftet att erhålla en kortare uppstartningstid, detonationer med en magrare blandning, samt att försöka öka förståelsen av det ovan demonstrerade temperaturberoendet. Parametrar som skulle kunna undersökas i detta sammanhang är bl.a. vilka och hur många insprutningsventiler som används, mängden av renblåsningens flöde, samt att försöka köra motorn utan turbulatorn.

Det vore också värdefullt om insprutningshastigheten på vätgas/luftblandningen kunde ökas, för att därmed erhålla en bättre omblandning (mellan bränslegaserna och restprodukterna från den föregående pulsen), samt en högre grad av turbulens initialt. Tidigare studier har visat att om antalet insprutningsventiler minskas ökar sannolikheten för detonationer. Detta kan förklaras av att hastigheten på flödet ökar när färre ventiler används, men det kan också förklaras av att blandningen blir "bättre" när ventilerna som används ligger närmare tändstiftet. På samma sätt som för insprutningstiden kan insprutningshastigheten inte varieras utan omkonstruktion av motorn.

Referenser

- [1] J. K. Tegnér, 'Initial studies of the Pulse Detonation Engine', Scientific report, FOA-R-98-00795-310-SE, June 1998, ISSN 1104-9154.
- [2] Jon Tegnér, 'An Introduction to the Pulse Detonation Engine', Novel Aero Propulsion Systems International Symposium, September 2000.
- [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 2002, ISSN 1650-1942.
- [5] Jon Tegnér & Stefan Olsson, 'Försök med PDE med multipel insprutning', FOI-R--0925-SE, september 2003, ISSN 1650-1942.

- [6] G. Ciccarelli, T. Ginsberg, J. Boccio, C. Finfrock, L. Gerlach, H. Tagawa, and A. Malliakos, 'Detonation cell size measurements in high-temperature hydrogen-air-steam mixtures at the bnl high-temperature combustion facility', Technical Report NUREG/CR-6391, BNL-NUREG-52482, Brookhaven National Laboratory, 1997.