



Pulsdetonationsmotorns potential och initieringsproblematiken

Jon Tegnér, Mattias Elfsberg, Stefan Olsson

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Bekämpning och skydd

Tel: 08-555 030 00
Fax: 08-555 031 00

www.foi.se

Jon Tegnér, Mattias Elfsberg, Stefan Olsson

Pulsdetonationsmotorns potential och initieringsproblematiken

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer,ISRN FOI-R--1788--SE	Klassificering Tekniskrapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning och skydd	
	Månad,år December 2005	Projektnummer E 2006
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
	Delområde2	
Författare/redaktör Jon Tegnér, Mattias Elfsberg Stefan Olsson	Projektledare Bengt Eiderfors	
	Godkändav	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/ellervetenskapligt ansvarig Jon Tegnér	
Rapportenstitel Pulsdetonationsmotorns potential och initieringsproblematiken		
Sammanfattning I denna rapport redovisas resultaten av arbetet rörande pulsdetonationsmotorn inom framdrivningsprojektet. Initieringen av detonationen bedöms vara det största hindret för att kunna realisera motorprincipens attraktiva potential. Detta problem har därför attackerats både med experimentella metoder och med simuleringar. Resultaten från simuleringarna har indikerat en möjlig väg för att göra initieringen effektivare, och en motor baserad på dessa resultat har därför konstruerats och byggts. Denna motor har fått arbeta med pulserande förbränning i detonationsform, men det har ännu inte kunnat verifieras att initieringen verkligen har blivit effektiviserad.		
Nyckelord Pulsdetonationsmotorn, detonationer, pulserad förbränning, simuleringar, radikaler		
Övrigabibliografiskauppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 40 s.	
Distributionenligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Vapen och skydd 147 25 Tumba	Report number, ISRN FOI-R--1788--SE	Report type User report
	Programme Areas 5. Strike and protection	
	Month/year December 2005	Project no. E 2006
	Subcategories 51 Weapons and Protection	
	Subcategories2	
Author/s (editor/s) Jon Tegnér Mattias Elfsberg Stefan Olsson	Project manager Bengt Eiderfors	
	Approved by	
	Sponsoring agency FM	
	Scientifically and technically responsible Jon Tegnér	
Report title (In translation) The potential of the pulse detonation engine and the initiation of the detonation		
Abstract In this report the results of the study of the pulse detonation engine within the framework of the propulsion project is presented. The initiation of the detonation has been identified as the biggest obstacle preventing the practical realisation of the attractive potential of the principle. This specific problem has hence been attacked both through experimental methods and through simulations. The results from the simulations has shown one possible way to make the initiation more efficient, and an engine based on these results has been constructed and built. This engine operates with pulsating combustion in detonation mode, but it remains to show that the initiation has been simplified.		
Keywords Pulse detonation engine, detonations, pulsed combustion, simulations, radicals		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 40 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehåll

1 Inledning	5
2 Beräkningar	7
2.1 DDT med enstegskinetik	8
2.1.1 DDT i två dimensioner	8
2.1.2 Gradientdriven DDT i en dimension	11
2.2 Betydelse av radikaler	13
2.2.1 En puls i två dimensioner	13
2.2.2 Förbränning under konstant volym	14
2.2.3 Direktinitiering	15
2.2.4 DDT	19
2.3 Direktinitiering i bränsle/luftblandningar blandade med heta restprodukter	21
2.4 Detonationens cellstruktur	22
3 Experiment	24
3.1 Beskrivning av motorn och kringutrustning	25
3.2 Resultat från körningar	29
4 Diskussioner och fortsatt arbete	35
5 Slutsatser	38

Pulsdetonationsmotorns potential och initieringsproblematiken

*Jon Tegnér, Mattias Elfsberg & Stefan Olsson **

1 Inledning

Pulsdetonationsmotorn (eller PDE – Pulse Detonation Engine), är en motorprincip som i en mängd studier visats besitta ett flertal attraktiva egenskaper. Bland annat har följande nämnts; hög specifik impuls, enkel och billig, motorn kan göras kompakt och den har ett stort hastighetsregister. Den viktigaste av dessa egenskaper torde vara att motorn har potential att bli betydligt billigare än en turbojetmotor, med likartade prestanda. Syftet med arbetet under det treåriga projektet har därför varit att utreda huruvida det är möjligt att realisera motorprincipens goda potential i en praktisk motor.

Principen började studeras redan på 40-talet (Hoffman, referens saknas dock, men arbetet finns nämnt i [1]). Trots detta har ännu ingen flygande farkost demonstrerats med denna typ av motor (november 2005). En grupp vid U.S. Air Force aviserade dock för två år sedan att en flygning var nära förestående, försök genomfördes på marken, men ännu har inte heller detta koncept fått luft under vingarna.

I en annan del av projektet genomfördes en övergripande studie av utvecklingen inom området framdrivning av taktiska missiler de senaste fem åren, se [2], och i denna ingick även att utvärdera utvecklingen inom PDE-området. Denna studie illustrerade att området är föremål för aktiv och ökande forskning. En stor del av denna forskning har varit inriktad mot olika metoder att förenkla initieringen av detonationen, samt för att utveckla optiska mätmetoder som möjliggör att mäta tillstånden i motorn. I en del arbeten har prestandan av en missilapplikation med en pulsdetonationsmotor uppskattats. Inte i något fall har en ”flygfärdig” motor presenterats, och inom projektet har bedömningen gjorts att den viktigaste anledningen till att så lång tid har gått utan flygande tillämpningar är svårigheterna att initiera detonationen i blandningar av luft och ”rimliga” (de kan inte vara för giftiga, dyra, eller utrymmeskrävande) bränslen. Antingen är initieringsenergin oacceptabelt hög eller också är övergångsprocessen från långsam förbränning till detonation inte tillräckligt snabb. För att kunna ha möjlighet att utreda principens realiserbarhet, prestandan för en praktisk motor, samt i vilka tillämpningar det är attraktivt att utnyttja den har projektet inriktats mot att studera just problemen förknippade med initieringen av detonationen. Det vill säga, en stor del av arbetet har varit inriktad mot detonik, något som trots att det i detta fall rör sig om detonationer i gasform även ger kunskap som kan användas vid fasta sprängämnen (tex. är kunskapen tillämpbar vid studiet av okänsliga sprängämnen). Eftersom utvecklingen av princip till praktisk motor har varit långsam (i jämförelse med jetmotorn som på allvar började studeras på 30-talet) gjordes i projektet därför bedömningen att det skulle vara fördelaktigare att välja ett annat spår än det som typiskt valts vid andra forskningscentra

*FOI, 172 90 Stockholm, Sweden Stockholm, Sweden

(naturligtvis med en förhoppning om att uppnå bättre prestanda än vad som har uppnåtts hittills).

På FOI har sålunda initieringsproblematiken attackerats på två fronter; dels har simuleringar använts för att studera förenklade problemställningar, och baserat på resultaten från dessa simuleringar har en motor konstruerats, byggts och testats. Både det numeriska och det experimentella angreppssättet är behäftade med stora svårigheter. De fysikaliska problemen är så komplexa att det är ogörligt att med beräkningsmetoder erhålla kvantitativt riktiga resultat av de förlopp som leder till övergångar till detonationer. Problemets komplexitet gör det också mycket svårt att mäta vad som faktiskt äger rum under ett experiment – dyra och komplicerade optiska mätmetoder måste användas för att mäta de olika variablerna i strömningsfältet. Olika metoder måste användas för att tex. mäta temperaturen och koncentrationen av tex. OH, och mätningarna ger endast mätvärden i en begränsad del av fältet.

I numeriska studier har ett antal olika aspekter studerats; konstantvolymförbränning, endimensionella simuleringar av övergångar från en vanlig flamma till detonation, tvådimensionella beräkningar av en flamma som övergår till detonation, direkt initiering av detonationen i en dimension samt simuleringar av en puls i en tvådimensionell motor. För att kunna göra dessa simuleringar har, i samarbete med KTH, en realistisk modell för vätgaskinetik implementerats i den beräkningskod (utvecklad vid KTH) som använts.

Simuleringarna har visat att de radikaler som finns närvarande i restprodukterna i slutet av en puls gör, om dessa blandas med bränsle/luftblandningen, att den följande pulsen kan vara enklare att initiera. Resultaten måste dock betraktas med ett visst mått av försiktighet, eftersom det är baserade på modeller av verkligheten där viktiga moment försumrats, bla. har omblandningsfasen mellan bränsle/luftblandningen och restprodukterna från den föregående pulsen *inte* simulerats. Trots begränsningarna har dessa övningar varit till hjälp för att öka förståelsen för denna typ av problem, bla. har det visats att vid studier av detonationsövergångar är det viktigt att använda en kinetik där hänsyn är tagen till radikaler, och det har visats att förloppet bakom de ofta väldigt höga tryck som i experiment kan detekteras i samband med en övergång från flamma till detonation kan förklaras genom "ultrasnabb" förbränning i det av stötvågen komprimerade mediet mellan stötvågen och förbränningsfronten.

Genom att utnyttja de radikaler som finns närvarande i fältet i slutet av en puls kan det vara möjligt att reducera den energi som krävs för att initiera detonationen i den följande pulsen. Om detta vore möjligt skulle det ha flera fördelar, en enklare och snabbar initiering gör det möjligt att använda även okänsliga drivämnen, samt att uppnå högre frekvenser. På grund av "utspädning" med restprodukterna (och därmed ett lägre energiinnehåll) blir tryckspikarna lägre, vilket ger en lägre dragkraft/puls (något som troligen kan kompenseras för med en högre frekvens), men det leder också till mindre påfrestningar på strukturen och en lägre ljudnivå.

För att undersöka den ovan nämnda teorin konstruerades en motor där syftet var att låta den inströmmande bränsle/luftblandningen blandas med de heta restprodukterna. Till skillnad från vad som är brukligt sprutas bränsle/luftblandningen in genom 1 till 12 ventiler, placerade i längsled med 8 cm mellanrum, på toppen av motorn. En mängd olika parametrar har använts, och motorn har under vissa förutsättningar fått arbeta med detonationer i varje puls.

2 Beräkningar

Detonationernas dynamiska egenskaper – av vilka initieringen är en – är oerhört komplexa. Förloppen påverkas förutom av tillståndsvariablerna av graden av turbulens i flödet och förbränningen modelleras oftast med Arrhenius-uttryck, ett för varje reaktion, där antalet reaktioner kan vara väldigt stort (flera hundra), och där dessutom parametrarna i varje uttryck ofta är behäftade med ett stort mått av osäkerhet. För att kunna räkna på problemen har ett antal förenklade modellproblem behandlats. Det ligger i sakens natur att resultaten från dessa beräkningarna måste tolkas med viss försiktighet, men förhoppningsvis kan studierna klargöra vissa fenomen som kan vara betydelsefulla för förståelsen av de dynamiska förlopp som är av intresse. Flera olika koder har använts vid simuleringarna, bla. Chem3d utvecklad av Björn Sjögreen (KTH), Mozart, utvecklad av Jean-Luc Cambier (för närvarande vid Edwards Airforce Base), samt FOAM. För visualisering har bla. OpenDX använts, och körningarna har genomförts på de linuxkluster som finns på FOI, med parallellisering genom "message passing" (mpich och pvm).

I en studie, [5], användes enstegskinetik för att studera DDT. Detta gjordes dels i en tvådimensionell kanalströmning där förbränningen initierades genom en förhöjd temperatur i en begränsad del av beräkningsområdet, och dels genom att undersöka betydelsen av aktiveringsenergin och temperaturen på ett modellproblem i en dimension. Detta arbete beskrivs närmare i avsnitt 2.1.

I ett annat arbete, [6] studerades effekten av radikaler i strömningsfältet. Med hjälp av simuleringar av direkt initiering, DDT och konstantvolymförbränning visades att radikalerna i restprodukterna från en puls kan ha en stor inverkan då detonationen i den följande pulsen ska initieras. Simuleringar av en puls i en tvådimensionell motor visade också att de restprodukter som finns kvar i motorn då trycket på frontplattan gått ner till omgivningens tryck (och motorn är redo för att påbörja nästa puls) innehåller tillräckligt stora mängder radikaler för att kunna påverka initieringen av den följande pulsen. Analysen illustrerade också att det är viktigt att ta med radikaler vid denna typ av studier, dvs. simuleringar med enstegs kinetik är av begränsat värde. Detaljer från detta arbete presenteras i avsnitt 2.2.

Studier av effekten av radikaler vid direkt initiering, något som påbörjades i arbetet som kortfattat beskrevs ovan, fortsatte vid ett senare arbete. De viktigaste resultaten från detta arbete är att vid stötinitiering minskar stötstyrkan som krävs för att initiera detonationen då bränsle/luftblandningen mixas med restprodukter från den föregående pulsen innan antändningen. Detta arbete är inte tidigare publicerat, och beskrivs i avsnitt 2.3.

Den kod som använts vid det mesta av arbetet är utvecklad vid KTH, med visst bidrag från FOI, bland annat vad gäller kinetiken för detaljerad vätgasförbränning. Ett fenomen som är intressant i sammanhanget är de cellstrukturer som uppkommer under vissa förutsättningar då en detonation rör sig genom ett rör. Dessa fenomen kan ge värdefull information om detonationens dynamiska egenskaper, och storleken på cellerna är en bra indikation av mediets känslighet (mindre celler innebär att mediet är lättare att initiera). Bland annat för att validera koden genomfördes simuleringar av detonationens cellstruktur för ett fall som tidigare studerats i litteraturen. Resultaten från denna studie visas i avsnitt 2.4.

$T_0 = 300 \text{ K}$	$p_0 = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$	$W = 0.012 \text{ kg mol}^{-1}$	$Q = 1.0 \times 10^7 \text{ J kg}^{-1}$
$\gamma = 1.2$	T_i varierande	$x_{sc} = 0.3 \text{ m}$	K varierande

Tabell 1: Data i S.I. enheter.

2.1 DDT med enstegskinetik

Ekvationerna, och den numeriska metoden finns beskriven i [5]. De två olika studier som ingick i detta arbete beskrivs i varsitt avsnitt nedan. Variablerna vid dessa simulering var normerade och dimensionslösa, och de olika värden som användes är angivna i tabell 1, där T_0 är temperaturen i mediet, p_0 är trycket, W är molmassan (antagen samma både för produkt och reaktant), Q är värmen som frigörs vid reaktionen, $\gamma = C_p/C_v$, T_i är aktiverings temperaturen i Arrheniusuttrycket, x_{sc} är längdskalan som används för att normalisera problemet och K är reaktionshastigheten.

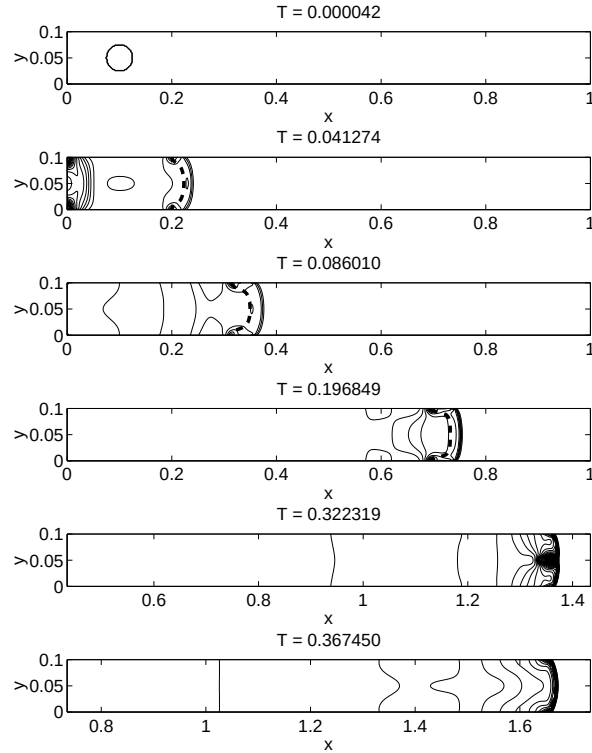
2.1.1 DDT i två dimensioner

I detta arbete användes en halv-oändlig kanal, och processen startades genom att höja energiinnehållet med 50% i en cirkel med radien $0.25\tilde{d}$ i kanalens mitt och placerad på avståndet $\tilde{d}$ från den halvoändliga kanalens vägg, där $\tilde{d}$ är den normaliserade bredden på kanalen. Beräkningsområdet translaterades med den stötvåg som bildas i processen, och när denna var 5% från områdets högra rand så började beräkningsområdet att följa stötvågens rörelse. I figur 1 visas reaktionsfrontens läge samt nivåkurvor av trycket vid olika tidpunkter. Reaktionsfrontens läge är inte helt entydigt, men definierades i arbetet av positionen där hälften av bränslet förbrukats. I figuren illustreras det för denna typ av simuleringar karaktäristiska förlopp: en stötvåg av ökande styrka bildas framför och separerat från den efterföljande förbränningen och själva övergången äger rum när förbränningsfronten accelererar och hinner ikapp stötvågen.

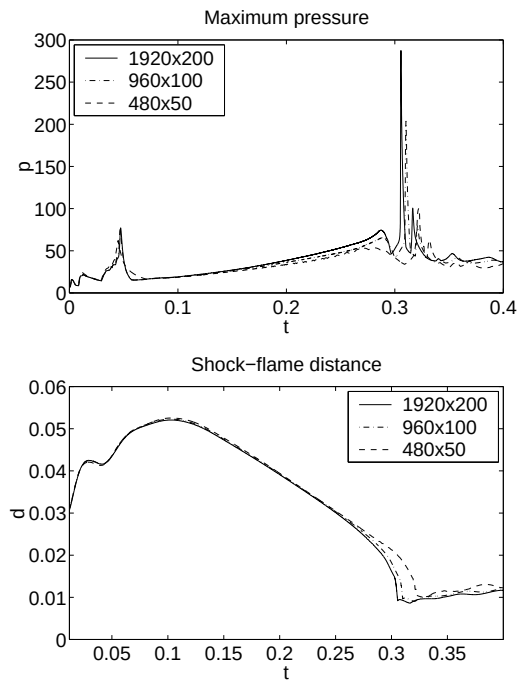
Vid denna simulering användes data från tabell 1. För de parametrar som inte är givna i den tabellen användes, $T_i = 14500 \text{ K}$ och $K = 3.0 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$. Transportparametrarna, μ, λ, D sattes samtliga till 0.01. Förloppet initierades genom att öka energin med 50% i initieringsområdet, vilket resulterade i en temperatur av $T = 1839 \text{ K}$ där. Detta problem refereras nedan som det *icke-styva* fallet. Denna typ av problem är väldigt känsligt för störningar, och för att kunna vara säker på att resultaten är korrekta måste beräkningarna vara väl upplösta. I bild 2 visas resultaten från en studie där storleken på beräkningscellerna varierades. I denna bild visas det högsta trycket i beräkningsområdet samt avståndet mellan stötvågen och förbränningsfronten som funktion av tiden. Näten som användes var 480×50 , 960×100 , och 1920×200 . Lösningen med det finaste nätet bedöms vara konvergerad.

Ytterligare ett fall studerades, där reaktionshastigheten K ökades till $K = 8.0 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$ och aktiveringsenergin till $T_i = 15000 \text{ K}$. Detta fall benämndes det *styva* fallet, och kurvorna motsvarande de i bild 2 visas i bild 3.

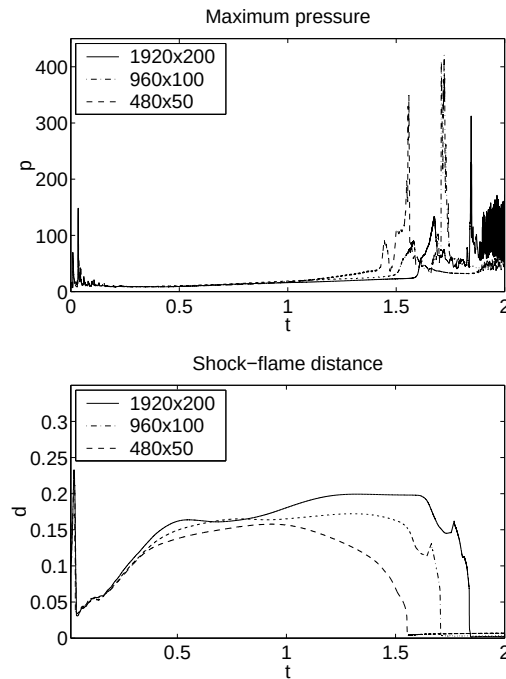
Som synes är denna lösning inte konvergerad, och ytterligare nätförfiningar hade varit nödvändiga för att uppnå detta. Med reservation för detta kan två trender identifieras, förändringarna i reaktionshastighet och aktiveringsenergi medförde dels ett högre maximalt tryck och dels en större separation mellan stötvåg och förbränningsfront. Det bedömdes som troligt att det var den ökade aktiveringsenergin som till största delen var ansvarig för detta fenomen, och för att utröna detta genomfördes beräkningar utgående från det icke-styva fallet där endast aktiveringsenergin varierades. De fall som behand-



Figur 1: Nivåkurvor av trycket (heldragna) och reaktionsfronten (streckad) vid olika tidpunkter för det icke-styva fallet.



Figur 2: Nätförfiningar. Det högsta trycket och avståndet mellan stöt och förbränningszon för det icke-styva fallet.



Figur 3: Nätförfiningar. Det högsta trycket och avståndet mellan stöt och förbränningszon för det styva fallet.

lades var $T_i = 13000\text{ K}$, $T_i = 14500\text{ K}$ (det icke-styva fallet), $T_i = 16000\text{ K}$ och $T_i = 17000\text{ K}$. För $T_i = 13000\text{ K}$ uppmättes den största separationen mellan stötvåg och förbränningsfront till 0.024 och det högsta trycket till 120. För $T_i = 14500\text{ K}$ var motsvarande siffror 0.052 och 206 och för $T_i = 16000\text{ K}$ uppnåddes 0.17 och 400. För det högsta värde på aktiveringsenergin som användes skedde ingen övergång, avståndet mellan stötvåg och förbränningszon oscillerade utan att några högre trycknivåer uppnåddes.

En numerisk uppskattning av konditionstalet genomfördes också. Det styva problemet på det grövsta nätet användes (för att få så snabba beräkningar som möjligt). Genom att räkna till tidpunkten just innan övergången, och där addera små störningar till lösningen, fortsätta beräkningarna över själva övergången och studera förändringarna i resultatet kunde konditionstalet uppskattas. Detta förfarande visade att störningarna innan övergången förstörades med en faktor mellan $10^5 - 10^6$. Detta innebär att denna typ av problem kan vara oerhört svåra att behandla numeriskt, men också experimentellt, där även en liten förändring i förutsättningarna kan innebära att resultatet blir helt annorlunda.

De tvådimensionella räkningarna visade att övergången till detonation kan delas in i tre faser.

1. I den första fasen bildas en stötvåg framför reaktionszonen. Denna stötvåg växer gradvis i styrka.
2. När stötvågen blivit tillräckligt stark är temperaturen i området mellan stötvåg och förbränningsfront så hög att en mer eller mindre samtidig förbränning äger rum i detta område, med resultatet att trycknivåer betydligt högre än ZND-trycket bildas där.
3. I den sista fasen minskar de extrema trycknivåerna, och en vanlig CJ-detonation bildas.

I studien noterades även att samma kvalitativa beteende kunde detekteras vid experiment, nämligen att övergången till detonation i vissa fall kan föregås av en tryckspik väl överstigande det maximala värdet för en CJ-detonation i det aktuella mediet.

2.1.2 Gradientdriven DDT i en dimension

Simuleringarna i en dimension genomfördes med syfte att studera betydelsen av *konvekterade explosioner* vid initieringsförlopp, [5, 17]. En förutsättning för att en konvekterad explosion ska bildas är att tillståndet i fältet ger upphov till gradienter i induktionstiden (något som tex. kan uppkomma på grund av gradienter i temperaturen). För att fenomenet ska manifesteras sig krävs, förutom gradienten i induktionstiden, även att mediet är ”på gränsen” att explodera. Detta leder till att ”lokala explosioner” uppkommer vid olika platser i fältet vid olika tidpunkter, något som i sin tur kan ge upphov till att en hastighet (för den konvekterade explosionen) kan definieras. I de endimensionella simuleringar som genomfördes visades att för att en detonation ska bildas måste hastigheten på den konvekterade explosionen vara relaterad till ljudhastigheten i mediet. Dvs. i de fall där reaktionen var för snabb, eller för långsam bildades ingen detonation.

Den modell som användes i denna studie kan sägas simulera den andra fasen i den två dimensionella simuleringen beskriven ovan. I syfte att förenkla ekvationerna antogs att de viskösa effekterna var av mindre vikt, och därför användes de icke-viskösa ekvationerna. I simuleringarna ansattes vidare en godtycklig gradient initialt i fältet:

$$Y(0,x) = \begin{cases} x & 0 \leq x \leq 1 \\ 1 & 1 < x \leq L \end{cases}$$

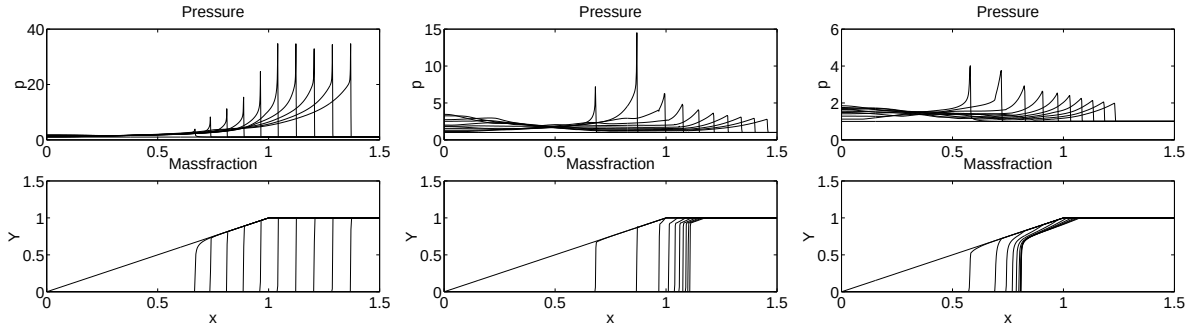
och

$$u(0,x) = 0, \quad p(0,x) = 1, \quad T = 1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} Q(1-Y)$$

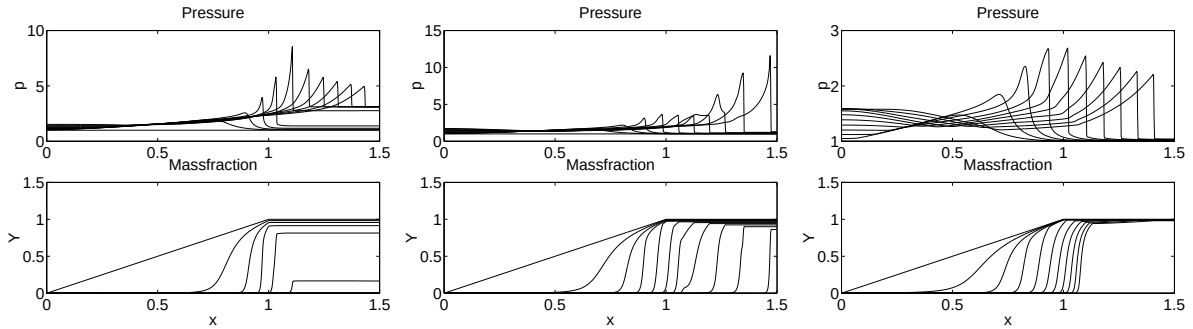
där L är längden på beräkningsområdet, Y är mängden bränsle, u är hastigheten, p trycket och T temperaturen. Liknande problem har behandlats tidigare, [9, 10, 11], men vid den aktuella studien varierades förutom längden på området med den varierande induktionstiden (”gradientområdet”) även aktiveringsenergin och grundtemperaturen i området. Motivationen bakom den varierande temperaturen hämtades från de tvådimensionella räkningarna ovan, där reaktionszonen rörde sig i ett område med successivt ökande temperatur (pga. stötvågen). Pga. detta användes styrkan på en fiktiv stötvåg, bestämd av stöt-Machtalet, Ma_{sh} , som parameter. Eftersom enstegs kinetik användes vid dessa räkningar påverkades resultatet endast av den förhöjda temperaturen och inte av förändringar i densitet. Initialt sattes hastigheten till noll i beräkningsområdet, och förutom temperaturen som varierades användes samma data som för det icke-styva fallet beskrivet ovan. Eftersom de ickeviskösa ekvationerna användes kan det visas att längden på ”gradientområdet” som krävs för att en detonation ska bildas är omvänt proportionell mot reaktionshastigheten K .

Tre värden på aktiveringsenergin användes, $T_i \in (13000, 15000, 17000)$ K. De olika värden på ”grundtemperatur” (dvs. temperaturen till höger om gradientområdet) som användes var givna av följande stöt-Machtal $Ma_{sh} \in (1, 3, 6)$, och antalet celler som användes vid räkningarna var 2000.

Resultaten från simuleringarna visas i bilderna 4-5. I bilderna visas trycket (övre delen) och mängden bränsle (nedre delen) vid 11 olika tidpunkter för att illustrera hur lösningen utvecklas med tiden. Notera att det tryck som visas är skalat med trycket bakom den fiktiva stötvågen som använts för att höja temperaturen, så det verkliga trycket erhålls genom att multiplicera trycket i figuren med trycket bakom stöten, p_{sh} .



Figur 4: Rumstemperatur, $p_{sh} = 1$ bar, $x_{sc} = 0.4$, $T_i = 13000, 15000, 17000$ K



Figur 5: $Ma_{sh} = 6$, $p_{sh} = 39$ bar, $x_{sc} = 0.01$, $T_i = 13000, 15000, 17000$ K

I det fall ingen höjning av temperaturen användes ($Ma_{sh} = 1$) sattes längdskalan till $x_{sc} = 0.4$. Denna skala valdes för att en detonation bildades för $T_i = 13000$ K, men inte för de högre värdena på aktiveringsenergin. Det visades också att övergång till detonation ägde rum även för de högre värdena om x_{sc} ökades. Den tryckspik som uppmättes för detta fall var 34 bar, vilket ska jämföras med ett teoretiskt ZND-värde på 41 bar. Anledningen till skillnaden i maxtryck är den artificiella viskositeten i problemet, se [12, 13].

Då $Ma_{sh} = 3$ och $x_{sc} = 0.15$ noterades ett liknande beteende, en detonation bildas då $T_i = 13000$ K, men ej då $T_i = 15000$ K eller $T_i = 17000$ K. ZND-trycket blev i räkningarna 200 bar, med ett teoretiskt värde av 220 bar för detta fall.

För den största temperaturhöjningen, $Ma_{sh} = 6$, $p_{sh} \approx 39$, användes en längdskala given av $x_{sc} = 0.01$ m. För detta fall bildades en detonation då $T_i = 15000$ K, och ett ZND-tryck av ungefär 450 bar uppnåddes. Det noterades att styrkan på stötvågen och utsträckningen på reaktionszonen just innan "explosionen" vid de tidigare tvådimensionella körningarna stämde förhållandevis väl överens med data i denna endimensionella beräkning. Vid de tvådimensionella beräkningarna uppnåddes ett maximalt tryck av ungefär 390 bar, vilket heller inte är allt för avlägset från de 450 bar som uppnåddes vid den endimensionella beräkningen.

Någon detonation bildades varken då $T_i = 13000$ K eller då $T_i = 17000$ K användes. För det lägre värdet på aktiveringsenergin var reaktionen alltför snabb, och mediet "brann upp" innan något extremtryck hann bildas. För det högre värdet var i stället förbränningen för långsam, och den nödvändiga kopplingen mellan stötvåg och förbränningszon uppnåddes aldrig (stöten "springer ifrån" förbränningen). Det är dock intressant att notera att bägge dessa fall kan fås att detonera, genom att ändra längdskalan x_{sc} (och därmed också längden på gradientområdet). Då $T_i = 13000$ K ska i så fall

längdskalan minskas, och då $T_i = 17000$ K ska den ökas.

Slutligen är det viktigt att påpeka att en vanlig flamma, en deflagrationsvåg, inte kan studeras med de icke-viskösa ekvationerna. Detta är också något som kan ses i figurerna, för de fall där stötvåg och förbränningszon separeras och då förbränningszonen mer eller mindre upphör att röra sig. Räkningarna visade dock att de icke-viskösa ekvationerna kan användas för att simulera konvekterade explosioner, och viktiga egenskaper hos dynamiken kan exemplifieras. Bl.a. kunde det visas att utsträckningen på gradientområdet som krävs för att en detonation ska bildas drastiskt reducerades om området hettades upp (tex. genom passagen av en stötvåg).

2.2 Betydelse av radikaler

Syftet med denna studie var att försöka förklara varför det är betydligt enklare att erhålla detonationer i en motor som arbetar med repetitiv förbränning jämfört med experiment med försök med endast ett skott, [14, 15, 16], samt att om möjligt utnyttja denna kunskap för att ta fram en effektiv princip för initieringen av detonationen i en PDE. En möjlig förklaring kan vara att temperaturen på motorn snabbt stiger (de motorer som demonstrerats får snabbt glödande pipor). En annan möjlig förklaring kan vara att fickor med avgasprodukter från den föregående pulsen finns kvar i motorn när den nya bränsle/luftblandningen sprutas in. En kombination av dessa bägge fenomen är också en möjlig förklaring. I denna studie låg fokus på att med hjälp av förenklade modeller undersöka effekten av radikaler. Tre olika modeller studerades:

- Förbränning under konstant volym.
- Direktinitiering i en dimension.
- DDT i en dimension.

I detta fall användes en detaljerad kinetik (38 steg) för vätgasförbränning, och för att få en uppfattning om fördelningen av komponenter i slutet av en puls genomfördes en tvådimensionell simulering där fokus lades på tillstånden i slutet pulsen.

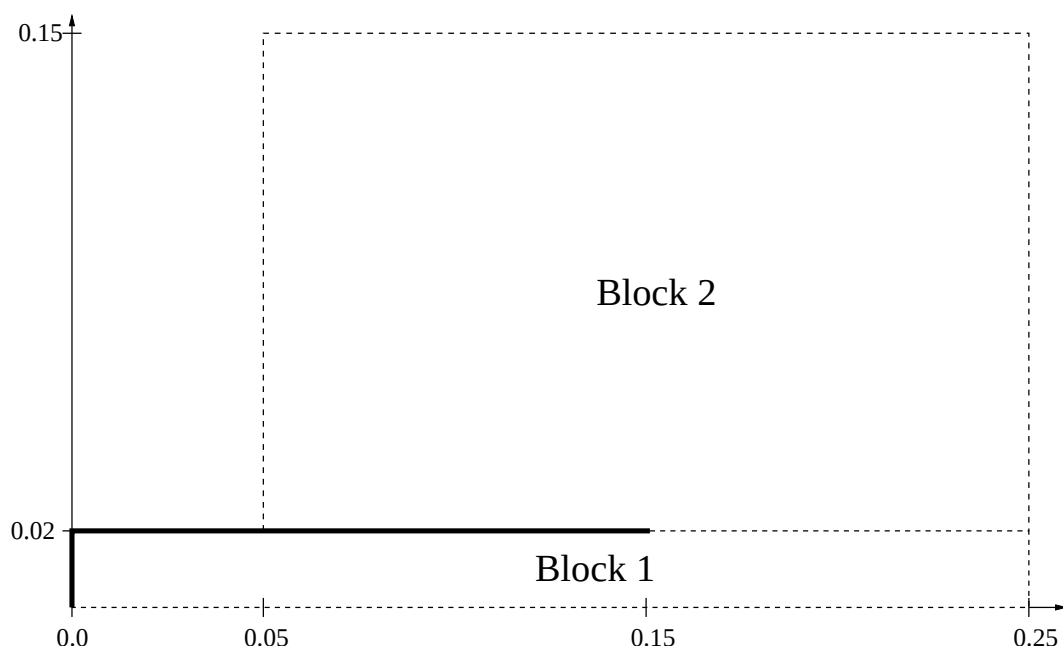
En väsentlig begränsning i studien var att omblandningen mellan de heta restprodukterna och den kalla bränsle/luftblandningen inte simulerades. Detta är ett viktigt, och svårt, problem och genom att inte behandla detta går det inte att veta när förutsättningarna för den förenklade initieringen ska infinna sig. Dock visade de genomförda simuleringarna att *om* förutsättningarna är de rätta är radikalerna från den föregående pulsen *en* möjlig förklaring till att det är lättare att initiera detonationer vid pulserande förbränning.

De olika delarna i studien redovisas i avsnitten nedan.

2.2.1 En puls i två dimensioner

I detta moment användes en "multiblockkod", Mozart, skriven av Jean-Luc Cambier. Motorn som studerades var 4 cm bred och 15 cm lång. För att få ett korrekt beteende vid utloppet av motorn var det nödvändigt att ej lägga de externa ränderna i direkt anslutning till utloppet, en bild av motorn och beräkningsområdet visas i figur 6. Symmetrivillkor har använts, och i figuren visas endast hälften av den fullständiga konfigurationen. Block 1 består av 20x200 celler, och Block 2 består av 40x100 celler.

Initialt var röret fyllt med en stökiometrisk blandning av vätgas och luft, vid rumstemperatur och en atmosfär, och detonationen initierades genom att höja trycket och temperaturen till 50 atm och 2500 K i fem rader av celler närmast frontplattan (den vänstra



Figur 6: Motorn och beräkningsområdet.

randen). Beräkningen avslutades då trycket på frontplattan reducerats till 1 atm och då motorn slutat generera dragkraft, och var redo för nästa puls.

Trycket på frontplattan visas i figur 7. I figur 8 visas massandelarna på centrumlinjen vid slutet av simuleringen. Dessutom visas också, i figur 9, trycket och temperaturen på motorns centrumlinje och vid slutet av simuleringen.

Tillstånden vid slutet av simuleringen uppskattades till 1 atm och 2090 K, och uppskattningen av fördelningen av de olika ämnena vid samma tidpunkt är givna i tabellen nedan.

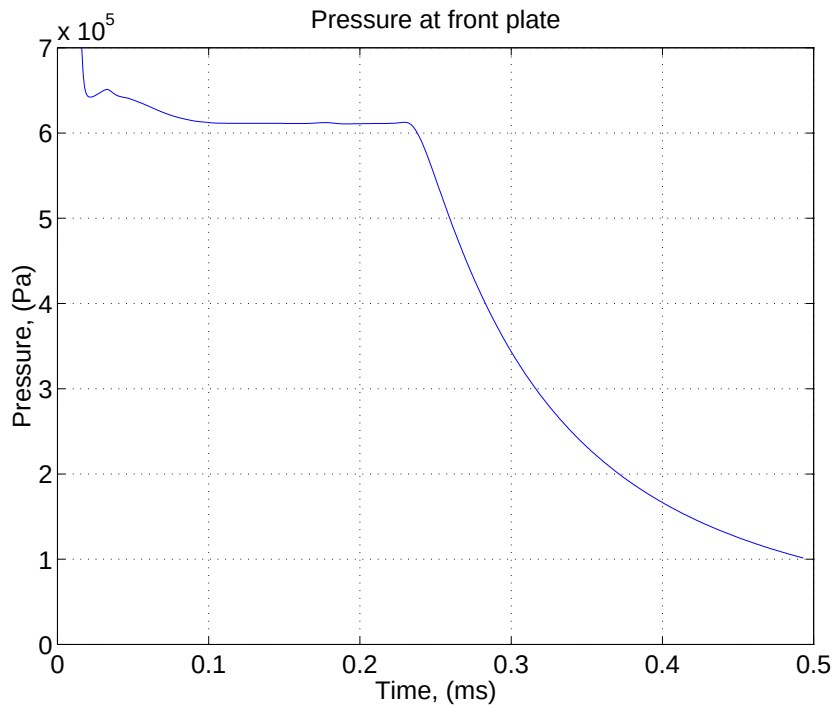
O	H	O ₂	H ₂	OH	H ₂ O	HO ₂	H ₂ O ₂	N ₂
$8.9 \cdot 10^{-4}$	$1.9 \cdot 10^{-4}$	0.012	0.0017	0.0060	0.235	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$1.1 \cdot 10^{-6}$	0.744

2.2.2 Förbränning under konstant volym

Vid dessa simuleringar användes blandningar av kall bränsle/luftblandning och heta restprodukter (från de tvådimensionella simuleringarna ovan) där andelen heta restprodukter varierades mellan 50%, 60%, 70% och 80%. Med dessa procentsatser blev tillstånden och fördelningen av de olika ämnena såsom angivet i tabellen nedan:

prod.	temp.	pres.	O	H	O ₂	H ₂	OH	H ₂ O	HO ₂	H ₂ O ₂
50%	580	$1.1 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-5}$	0.20	0.025	$8.4 \cdot 10^{-4}$	0.033	$2.5 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^{-7}$
60%	690	$1.2 \cdot 10^5$	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$3.7 \cdot 10^{-5}$	0.18	0.023	0.0012	0.046	$3.5 \cdot 10^{-7}$	$2.1 \cdot 10^{-7}$
70%	850	$1.2 \cdot 10^5$	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$5.2 \cdot 10^{-5}$	0.17	0.021	0.0016	0.064	$4.9 \cdot 10^{-7}$	$3.0 \cdot 10^{-7}$
80%	1072	$1.2 \cdot 10^5$	$3.5 \cdot 10^{-4}$	$7.5 \cdot 10^{-5}$	0.14	0.018	0.0024	0.092	$7.1 \cdot 10^{-7}$	$4.3 \cdot 10^{-7}$

Dessutom, för att isolera effekten av radikalerna från temperaturen, gjordes simuleringar där samtliga radikaler (dvs., O, H, OH, HO₂ och H₂O₂) hade tagits bort från blandningen initialt. Den sammanlagda massan av blandningen påverkas av detta, men, som kan ses från tabellen ovan, inte särskilt mycket. Radikalen som dominerar är OH,

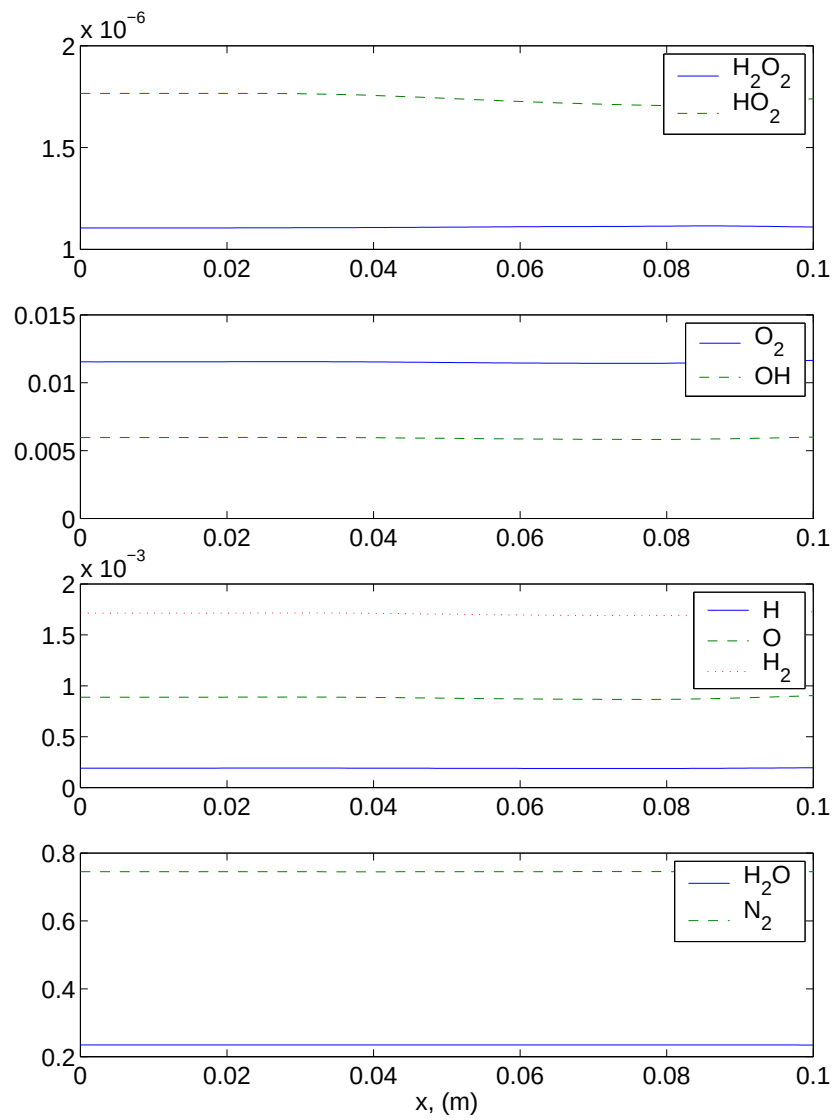


Figur 7: Trycket på frontplattan under en puls.

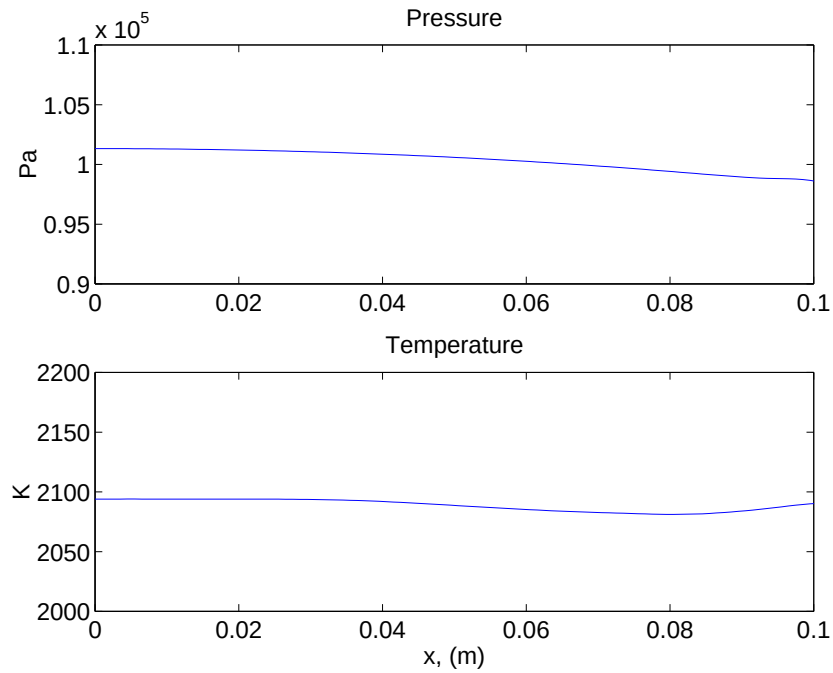
men inte i något av fallen översteg massandelen av den radikalen en fjärdedels procent. I figur 10 visas temperaturen som funktion av tiden för de olika blandningarna. Från dessa kurvor är det möjligt att uppskatta induktionstiden, och det är uppenbart att radikalerna är av stor betydelse. För fallet då andelen förbränningsprodukter var 70% är skillnaden i induktionstid nästan fem storleksordningar. En annan trend som kan noteras är att den förhöjda temperaturen som är en följd av en ökande andel förbränningsprodukter också reducerar induktionstiden (till en viss gräns naturligtvis, då andelen förbränningsprodukter är 100% är det inte längre möjligt att definiera någon induktionstid). Dessa simuleringar inkluderade inte någon information om variationer i rummet, och de kan därför inte säga något om när och hur en detonation kan bildas. Däremot, eftersom den matematiska modellen (endast) är en samling ordinära differentialekvationer som effektivt kan lösas med en adaptiv metod, är det troligt att de numeriska resultaten stämmer väl överens med verkligheten. Det är också rimligt att anta att om dessa blandningar kan uppkomma någonstans i motorn så kan det vara betydligt enklare att initiera detonationen.

2.2.3 Direktinitiering

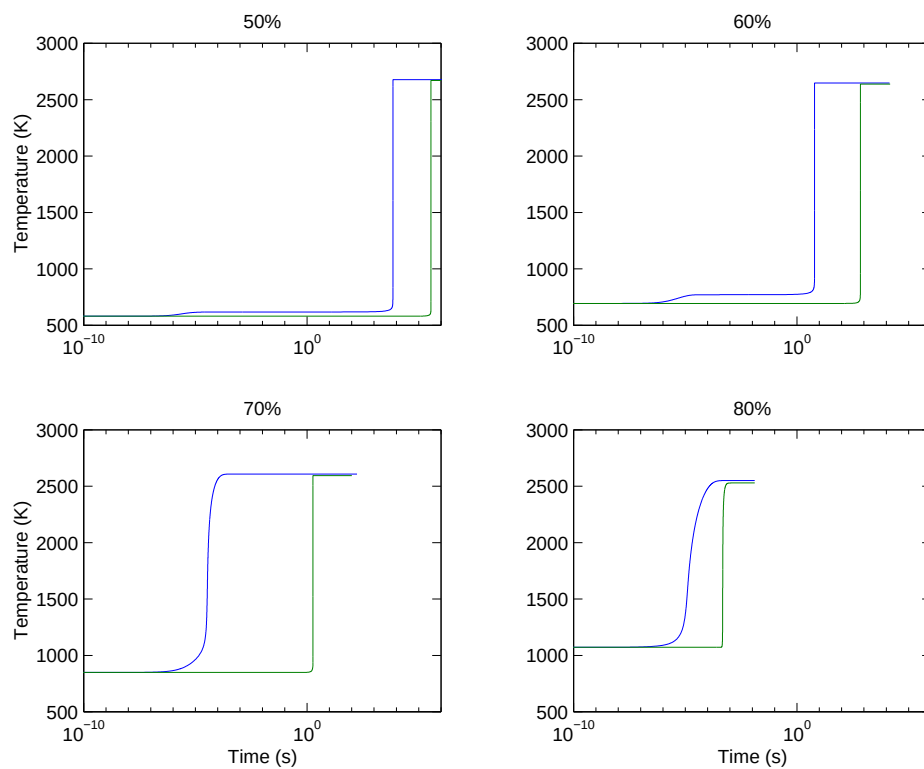
I ett försök att bättre simulera radikalernas betydelse vid initiering studerades även direktinitiering i en dimension. Även i detta fall användes de icke viskösa ekvationerna. Blandningen som studerades bestod till 40% av oförbränt, med de resterande 60% bestående av de heta gaserna vid slutet av den tvådimensionella simuleringen beskriven ovan. Dessutom gjordes beräkningar med en kall bränsle/luftblandning. Energitätheten som användes för att starta processen var 6 MJ/m^3 , och denna förhöjda energi applicerades i ett område som var 1 mm brett i anslutning till den vänstra randen (i en "verklig" motor med tvärsnittet $5 \times 5 \text{ cm}$ hade detta motsvarat 15 J). Beräkningsområdets längd var 2 cm, antalet celler var 20000, CFL-talet var 0.16 och beräkningarna hade en fysisk



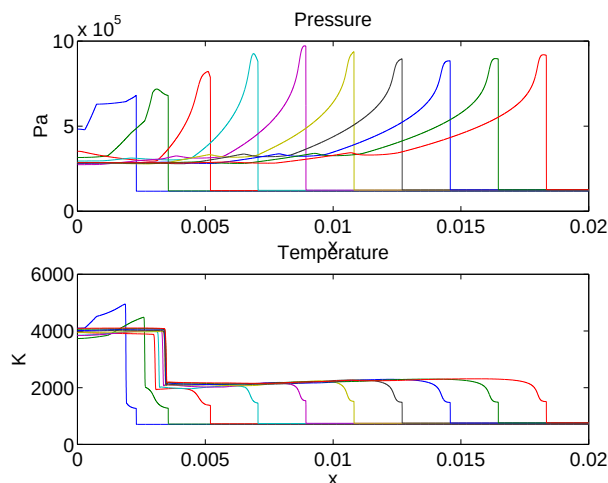
Figur 8: Massandelar på centrumlinjen vid slutet av pulsen.



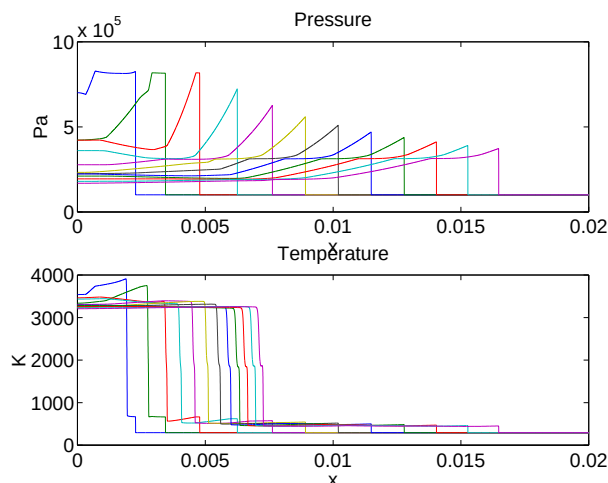
Figur 9: Tryck och temperatur på centrumlinjen vid slutet av pulsen.



Figur 10: Förbränning under antagande om konstant volym, blå kurvor: med radikaler, gröna kurvor: med radikalerna borttagna. Procentandelen anger andelen heta förbränningsgasar.



Figur 11: Kurvor av tryck och temperatur vid olika tidpunkter då processen initierades i den heta blandningen med sluttiden=0.012 ms.

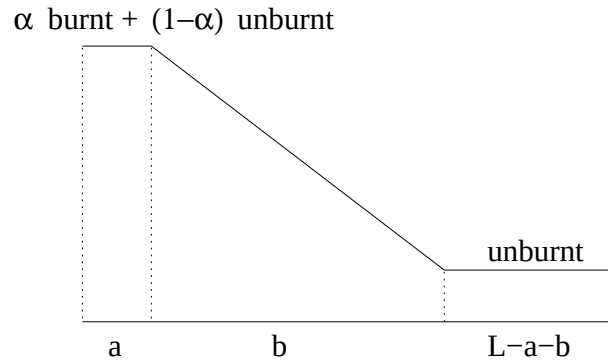


Figur 12: Kurvor av tryck och temperatur vid olika tidpunkter då processen initierades i den kalla bränsle/luftblandningen med sluttiden=0.018 ms.

sluttid av $t = 0.012$ ms då den heta blandningen behandlades och $t = 0.018$ ms då den kalla bränsle/luftblandningen användes. Anledningen till att använda olika sluttider var att förloppen utvecklades olika snabbt i de bägge fallen.

Resultaten från de olika fallen visas i figur 11 och 12. På samma sätt som tidigare illustreras utvecklingen av förloppet genom att rita kurvor av tryck och temperatur vid olika tidpunkter. Som synes från dessa kurvor bildades en detonation i den varma blandningen, men ej i den kalla. Den tryckspik som uppnåddes ligger betydligt under ZND-spiken för en vätgas/luftblandning, men detta beror (förutom till en viss del på den numeriska dissipationen i processen) på det lägre energiinnehållet i den heta blandningen (60% bestod av redan förbränt materia).

Simuleringar genomfördes också med radikalerna borttagna ur den heta blandningen, men i detta fall bildades ingen detonation (förloppet påminde om det illustrerat i figur 12). En studie med olika nätstorlekar genomfördes också, där storleken varierades mellan $dx = 3 \cdot 10^{-5}$ m och $dx = 1 \cdot 10^{-6}$ m. Vid finare nät blir fronterna "skarpare", och



Figur 13: Fördelningen i början av simuleringen.

detonationens tryckspik (i förekommande fall) ökar lite (i överensstämmelse med analysen i [12] och [13]). Den viktiga slutsatsen, nämligen den att en detonation bildas i den heta blandningen med radikaler närvarande, men inte i den kalla, eller den med radikalerna borttagna ur den heta, påverkades inte av nätförfiningen.

2.2.4 DDT

I det föregående avsnittet behandlades direktinitiering av detonationer. DDT är den andra viktiga metoden för initiering, och detta är ett oerhört komplicerat problem som ofta består av en kombination av stötupphettning och turbulent omblandning. En viktig komponent som ingår i detta förlopp är den konvekterade explosionen, se ovan. Denna fas av DDT-processen kan (åtminstone till viss del) behandlas i en dimension, och med de icke-viskösa ekvationerna. Dvs. simuleringarna i denna del tar inte hänsyn till omblandning, acceleration av flaman eller turbulens. Däremot kan resultaten användas för att få en kvalitativ uppskattning av storleken på de "gradientområden" som dessa fenomen behöver generera för att en detonation ska kunna bildas.

I beräkningarna användes en linjär profil mellan den kalla bränsle/luftblandningen och de heta restrprodukterna från slutet av den tvådimensionella simuleringen ovan (både med och utan radikaler). Tillstånden i början av simuleringen illustreras i figur 13, och i syfte att erhålla en snabb start av processen valdes $\alpha = 0.75$ (dvs. andelen heta gaser vid den vänstra delen av beräkningsområdet var 75% då simuleringarna startades (jämför avsnitt 2.2.2)).

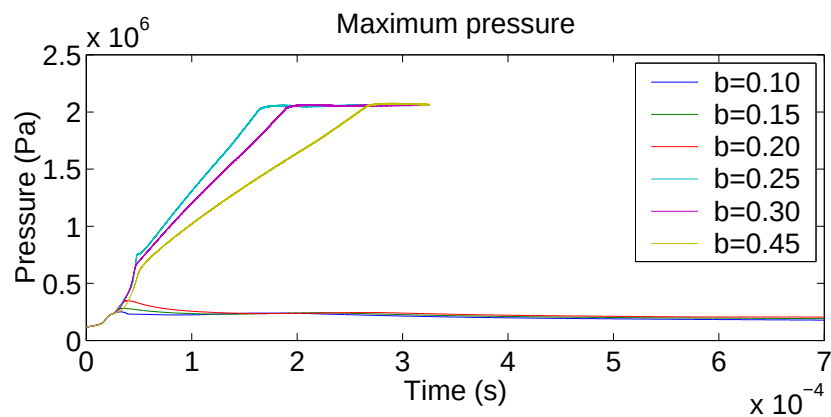
Övergången till en detonation beror både på blandningen själv (tex. är det betydligt lättare att starta en detonation om syrgas adderas till blandningen) samt på strukturerna i strömningsfältet (dynamiska effekter). Som nämnts ovan så behandlades inte bildandet av dessa strukturer i denna studie, men genom att variera längden på området där induktionstiden varierar – b i figur 13 – är det möjligt att använda endimensionella beräkningar för att uppskatta storleken på de turbulenta reaktionszoner som krävs för att en detonation ska kunna bildas. Genom detta förfarande är det möjligt att kvantifiera känsligheten på mediet (hur "enkelt" det är att initiera detonationen) genom att bestämma det minsta värdet på b för vilket en detonation fortfarande bildas. I tabell 2 visas data för beräkningarna där b har varierats (samma rumsliga upplösning användes i samtliga beräkningar, $dx = 0.0003$).

I figur 14 visas det maximala trycket som funktion av tiden för de olika värdena på b , och från den figuren är det uppenbart att en detonation bildas om $b \geq 0.25$ m.

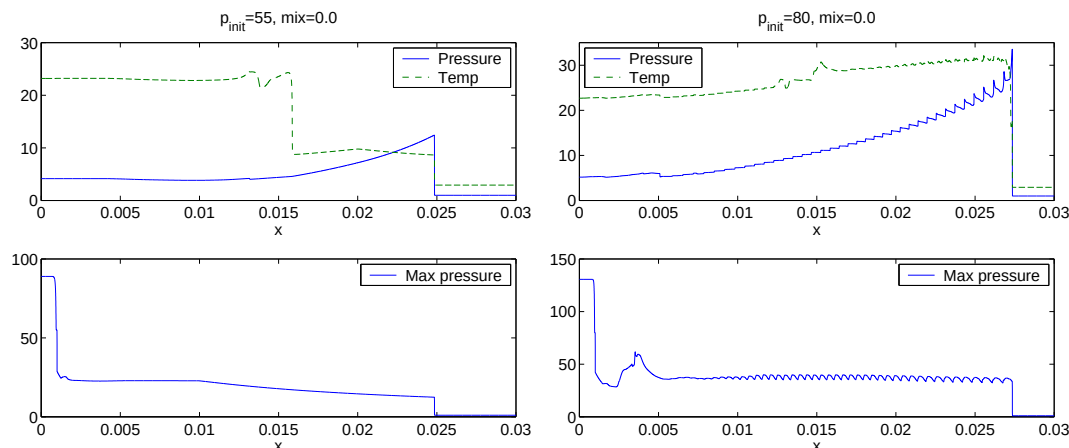
När radikalerna togs bort från lösningen initialt (en massandel mindre än två pro-

Data för DDT-beräkningar							
	Med radikaler						Utan radikaler
L (m)	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
a (m)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
b (m)	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.45	0.45
#celler	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
CFL	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.5
t_{end} (ms)	0.70	0.70	0.70	0.325	0.325	0.325	1.5
DDT?	nej	nej	nej	ja	ja	ja	ja

Tabell 2: Data och resultat från endimensionella DDT simuleringar.



Figur 14: Det maximala trycket för olika värden på b i en blandning mellan kall bränsle/luftblandning och heta förbränningsprodukter (med radikalerna kvar).



Figur 15: Kall bränsle/luftblandning. (a) Ingen detonation bildas när trycket i drivarsektionen var 55 atm. (b) Detonation bildas då trycket höjdes till 80 atm.

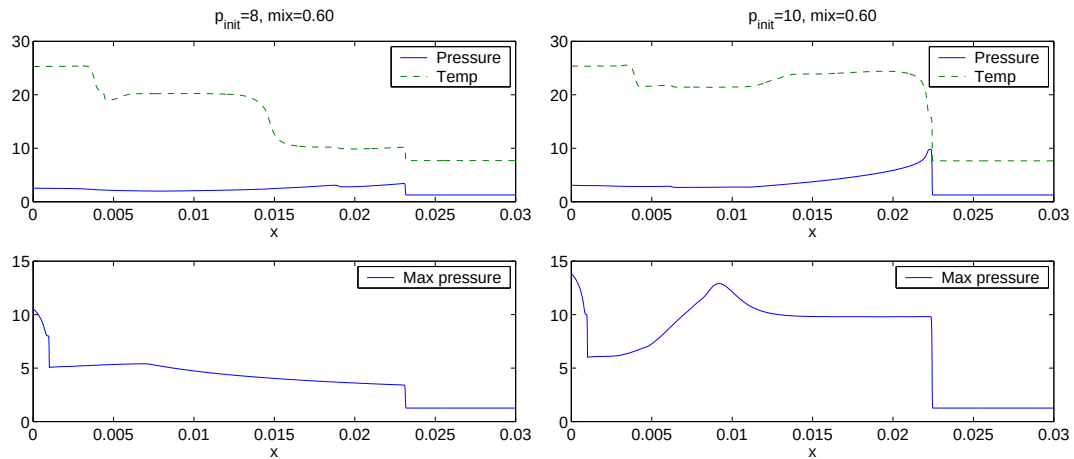
mille) så uppkom överhuvudtaget inte någon tryckökning i lösningen, och följaktligen bildades inte heller någon detonation. En viktig slutsats för dessa DDT-simuleringar är sålunda att de heta restprodukterna från en puls, och radikalerna däri, kan ha en stor inverkan på initieringen av den efterföljande pulsen.

2.3 Direktinitiering i bränsle/luftblandningar blandade med heta restprodukter

Den ovan beskrivna studien rörande effekten av radikaler vid direktinitiering fortsattes genom att variera både andelen heta restprodukter i blandningen och initieringsstyrkan. Koden och övriga förutsättningar var samma som tidigare, förutom beräkningsområdet som var 3 cm, och initieringen som startades genom att sätta temperaturen till 2000 K i drivarsektionen samtidigt som trycket där varierades för att hitta ett "kritiskt tryck" för vilket en detonation bildades. Syftet var att visa hur detta kritiska tryck kunde minskas genom en ökande andel heta restprodukter i beräkningsområdet. De blandningar som studerades var:

- Bränsle/luftblandningen vid rumstemperatur.
- 25% heta restprodukter.
- 50% heta restprodukter.
- 60% heta restprodukter.

Dessutom genomfördes en nätförfiningsstudie för att verifiera att fenomenen inte var beroende av nätstorleken. Två exempel från studien visas i figurerna 15 och 16. I dessa figurer är trycket normaliserat med 1 atm, och temperaturen med 100 K. I den vänstra delen av figuren visas resultat från simuleringar med ett initieringstryck som ej resulterade i övergång till detonation (olika för de olika blandningsförhållandena), och i den högra visas resultat där en detonation bildades. De övre bilderna visar trycket och temperaturen vid slutet av simuleringen, och den undre visar det största tryck som uppnåddes vid varje punkt i beräkningsområdet. I fallet med den kalla bränsle/luftblandningen (figur 15) går det att dra slutsatsen att det kritiska trycket ligger



Figur 16: 60% heta restprodukter. (a) Ingen detonation bildas när trycket i drivarsektionen var 8 atm. (b) Detonation bildas då trycket höjdes till 10 atm.

Data				
Mix	p_{init} (atm)	t_{final} (μs)	#celler	Detonation?
0.0	55	15	8000-32000	nej
0.0	80	12	8000-64000	ja
0.25	30	20	8000-32000	nej
0.25	35	14	8000-64000	ja
0.50	10	20	2000-8000	nej
0.50	15	14	2000-8000	ja
0.60	8	20	2000-8000	nej
0.60	10	14	2000-8000	ja

Tabell 3: Data och resultat för DDT beräkningar.

mellan 55 och 80 atm. Då blandningen till 60% består av heta restprodukter har det kritiska trycket reducerats till mellan 8 och 10 atm. I bägge fallen är det också tydligt att övergången föregås av visst övertryck som senare relaxeras till detonationstrycket.

De övriga blandningarna (25 och 50% heta restprodukter) uppvisar liknande beteende som de ovan beskrivna varför bilder från dessa ej visas. Resultaten från samtliga fall redovisas dock i tabell 3. Resultaten från den i tabellen indikerade nätförfiningen visade att lösningarna var konvergerade. Däremot lider modellen av samma svagheter som tidigare, själva blandningsprocessen simulerades inte, utan det förutsattes att en homogen blandning mellan de heta restprodukterna och den kalla bränsle/luftblandningen kunnat uppnås.

2.4 Detonationens cellstruktur

Detonationens dynamiska egenskaper, av vilka initieringen är en (andra är bla. den kritiska energin, den kritiska diametern, och "detonationsgränserna"), har experimentellt visat sig kunna relateras till de cellstrukturer som ofta bildas när en detonation rör sig genom ett rör. Till exempel så har det visats att den energi som krävs för att initiera en detonation direkt i ett medium är proportionell mot λ^3 , där λ är storleken på cellen. Generellt kan sägas att ett medium med små celler är lättare att initiera än ett



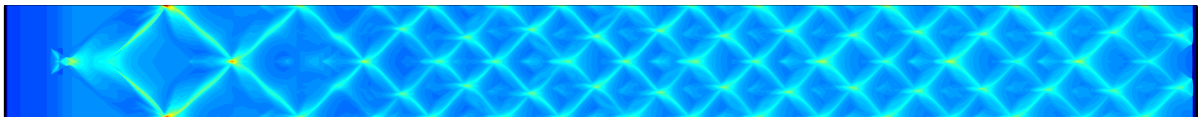
Figur 17: Emulerad slirbild för tidpunkten 500 μ s.

med stora. Detta gör det också möjligt att i viss utsträckning jämföra olika gaser – är cellerna av samma storlek, så är ofta även initieringsegenskaperna likartade. Av dessa anledningar är det betydelsefullt att kunna simulera denna typ av fenomen, speciellt som detta är det enklaste av de problem som är relaterade till detonationens dynamik – en DDT-process är tex. betydligt mer krävande, bla. eftersom denna process i hög grad är beroende av turbulensen i strömningen, samt förstås också av accelerationen av flammen. Den relativa enkelheten gör att det går att erhålla konvergerade lösningar för en del av problemen i denna kategori (till skillnad från vad som är möjligt för realistiska DDT-processer). Detta har också gjort att simuleringar av cellstrukturer är en bra metod att jämföra olika koder med varandra, men också för att validera koderna mot experimentella resultat.

För att validera koden genomfördes därför cellsimuleringar av ett i litteraturen tidigare behandlat fall, nämligen en detonationssimulering i en stökiometrisk H_2 - O_2 blandning utspädd med 70% Ar, och initialt vid tillståndet 6.67 KPa och 298 K, [18, 19].

I räkningarna användes ett tvådimensionellt beräkningsområde med dimensionen 6.016 ggr 6.016 cm, och antalet celler i varje riktning var satt till 600. Räkningarna initierades genom att ansätta en plan detonationsprofil, kompletterat med en liten störning 0.3 cm bakom stötvågen. Störningen var adderad för att snabbare “få igång” cellstrukturerna, något som annars skulle ha tagit betydligt längre tid. De i litteraturen redovisade resultaten ([18, 19]) använde en 24-steps mekanism med 8 olika ämnen, studien vid FOI använde en 38-steps mekanism. Resultaten stämde väldigt väl överens, och i figur 17 visas en emulerad slirbild (från tidpunkten 500 μ s då stabila celler bildats). I denna figur syns hur detonationen (som rör sig åt höger i bilden) inte består av en plan front, utan förutom en propagerande stötvåg även består av transversella stötvågor som rör sig både uppåt och neråt i fältet (något som kan visas genom att betrakta lösningen vid olika tidpunkter). Dessutom är det tydligt hur själva förbränningszonen i vissa delar av fronten är isärkopplade från den främre stötvågen, samt att det är de transversella stötvågorna som är ansvariga för att återigen koppla samman stötvågen med förbränningsfronten.

I figur 18 illustreras de celler som bildas då detonationen rör sig genom beräkningsområdet (olika skalor används på de olika axlarna). I denna bild har det maximala tryck som uppkommit i varje punkt i det tvådimensionella beräkningsområdet färgko-



Figur 18: Cellstrukturer från detonation i tvådimensionellt beräkningsområde.

dats (“colormap(jet)” i matlab), med mörkt blått representerande det lägsta trycket. Det är det höga tryck som bildas i anslutning till trippelpunkterna, vilka är tydliga i figur 17, som är orsaken till att detta cellmönster bildas.

3 Experiment

I denna del beskrivs hur resultat från beräkningar använts för att konstruera en ny typ av pulsdetonationsmotor. Vidare beskrivs en del av de försök som genomförts med denna motor. De numeriska simuleringarna har beskrivits ovan, och 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. Inom ramen för dessa förenklingar indikerar dessa resultat en möjlig metod att underlätta initieringen. Den allvarligaste förenklingen i de metoder som använts i detta arbete är avsaknaden av modellering av omblandningsförloppet mellan det heta restprodukterna och bränslegaserna för den följande pulsen. I simuleringarna antogs istället blandningen vara momentan och insprutningsfasen försummas. Resultaten från dessa simuleringar ska därför tolkas med viss försiktighet, och kan i första hand användas för att avgöra vilken typ av konfiguration som ska studeras närmare med experimentella metoder. På grund av praktiska begränsningar kommer de idealiseringar som antagits vid simuleringarna att vara mer eller mindre uppfyllda. Bl.a. gör tryckbegränsningar i blandningskammaren att blandningsprocessen i den “verkliga” motorn är långt ifrån momentan.

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, och det viktigaste syftet är att experimentellt undersöka om metoderna för att underlätta initieringen av detonationen fungerar i praktiken.

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 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 flammen 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 radikaler som är närvarande i 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 (som tex. flygfotogen).

Principen om radikalernas möjlighet att förenkla initieringen av detonationen har använts för att konstruera en motor, och denna motor byggdes 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 byggdes baserad på dessa principer består i korta drag av:

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

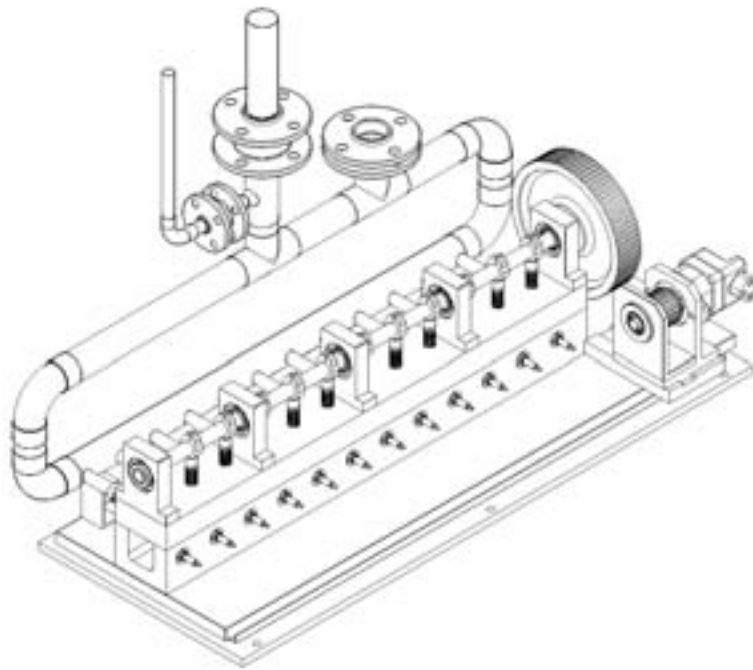
Ventilerna öppnas och stängs av kamnocker på en axel vilken drivs av en hydraulmotor. Dessa och övriga komponenter beskrivs närmare i avsnittet nedan.

3.1 Beskrivning av motorn och kringutrustning

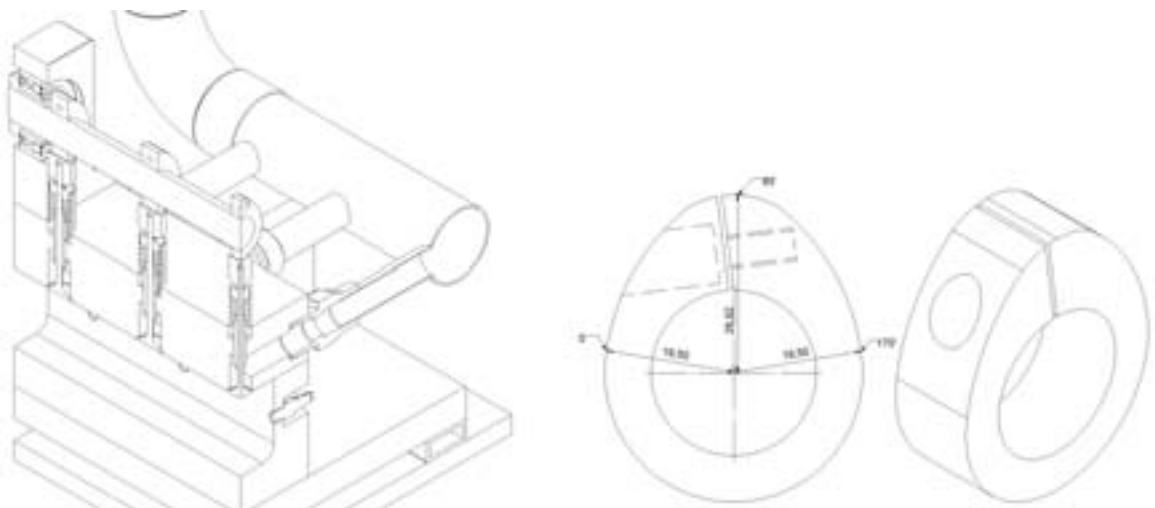
Motorn är 96 cm lång, har ett kvadratisk tvärsnitt om $6 \times 6 \text{ cm}^2$ vilket ger en volym av 3.4 liter. Som bränsle användes en färdigblandad blandning av vätgas och luft. Denna blandning kan sprutas in genom en till tolv ventiler längs motorns övre del. Den första av dessa ventiler är placerad 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). I figur 19 visas en bild av motorn som 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 kamnocker är illustrerade i figur 20. I denna figur är vinklarna som används för att beskriva ventilernas öppnande och stängande införda. Vinkeln 0° definierar den punkt på varvet då lyftkurvan är tillbaka på nockens grundcirkel, men på grund av ventilspelet på ca. 0.2 mm sker stängningen av ventilerna något innan den valda stängningsvinkeln (ca. 20°).

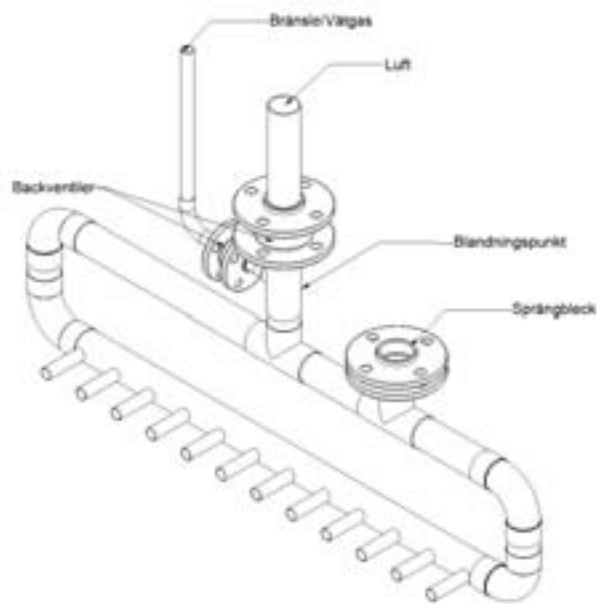
Matningsröret, eller blandningskammaren, är tillverkade av kopparrörskomponenter för vattenledningssystem (54 och 22 mm diameter). En bild av denna konstruktion återges i figur 21. Matningsröret har utformats efter följande kriterier:



Figur 19: Motorn, med kringutrustning.



Figur 20: Ventilmekanism och kamnockar.



Figur 21: Blandningskammaren.

- Minimera tryckdifferenserna 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.

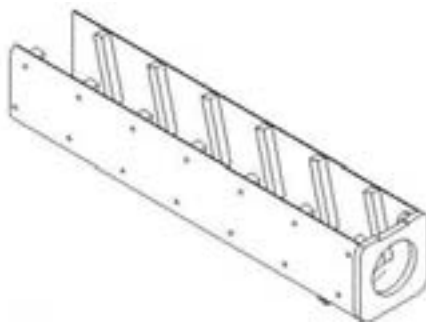
Blandningskammaren är försedd med ett sprängbleck av 100 μm mylarfilm och med en diameter av 54 mm.

Ventilmekanismen drivs av en högvarvig hydraulmotor och transmissionen från denna hydraulmotor till drivaxeln sker med tandrem (vilket illustreras i figur 19). Med nuvarande utväxling (1:4) är den maximala frekvensen 40 Hz.

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

På motorns ena sida finns 12 st tryckgivarehåll och på dess andra sida 12 st tändstiftshåll. Dessa mätstift är i det följande numrerade 1 till 12 från motorns framkant. Tändstift i tändstiftshållen kan användas för att tända blandningen, men de kan också användas för att mäta ledningsförmågan och därmed användas för att detektera förbränningsfrontens rörelse. Dessa mätstationer är placerade på samma position i längsled som insprutningsventilerna. Ett tändstiftshåll finns också på motorns främre gavel.

Vid de inledande försöken med motorn erhöles inga detonationer. Däremot noterades att starkare stötar erhöles då färre ventiler användes. På grund av begränsningar i fjäderspänningen för ventilerna kunde dock inte färre än tre ventiler användas (vid 20 Hz). En möjlig förklaring till den ökande stötstyrkan kan vara att färre ventiler resulterar i en större hastighet på de inströmmande gaserna, något som i sin tur leder till större grad av turbulens och därmed en snabbare förbränning och starkare stötar i strömningfältet. Det är dock inte den enda möjliga förklaringen, det är också möjligt att bränsle/luftblandningen i anslutning till tändstiftet blir "bättre" då färre ventiler används (eftersom dessa då ligger "närmare" tändpunkten). En naturlig åtgärd – i enlighet med den första av dessa förklaringar – för att försöka förbättra situationen hade varit



Figur 22: Turbulator.

att låta ventilerna vara öppna en kortare del av varvet för att därigenom uppnå högre strömningshastigheter innan antändning, något som har visats göra DDT-processen snabbare, [20]. Eftersom konstruktionen inte helt lätt tillåter denna modifikation användes i stället två andra åtgärder:

1. För att skapa turbulens i strömningfältet komplementerades motorn med en 30 cm lång "turbulator" av stål, placerad 16 cm från motorns främre gavel (där tändstiftet är placerat), se figur 22.
2. För att generera högre hastigheter i fältet placerades en strypning på den ände av turbulatorn som är riktad mot tändstiftet. Denna strypning ger upphov till en delvis avgränsad kammare – en "Smirnovkammare" – där ett högt tryck skapas när mediet förbränns vilket därefter leder till att en jetstråle med hög hastighet sprutar in i resten av motorn. I den genomförda studien provades strypningar med öppningar av tre olika storlekar, 20, 25 och 30 mm.

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 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 elektroderna. När en förbränning i någon form äger rum i anslutning till elektroderna 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. De invändiga termoelementen ger inga kvantitativa värden men väl kvalitativa, dvs. det går inte att avläsa någon verklig temperatur hos motorn eller gaserna men de gör det möjligt att jämföra försök med varandra.

Under de inledande försöken har motorn baktänt, dvs. mycket heta gaser eller en zon med kvardröjande förbränning har varit kvar i förbränningsrummet när ventilerna öppnats för att fylla på med bränsle/luftblandning inför nästa puls. Detta resulterar i att en oönskad förbränning sprider sig in i blandningskammaren, med påföljd att sprängblecket brister. För att motverka detta problem kompletterades motorn med en mindre grad av renblåsning genom att tryckluft anslöts till den första av ventilerna (den närmast tändningen). Samma form på kamnocken som för de övriga insprutningsventilerna användes, men vinkeln justerades så att renblåsningen avslutades innan tändningen av den följande pulsen. En annan möjlig åtgärd – istället för att använda renblåsning – hade varit att öka hastigheten på bränslegaserna som sprutas in i motorn eftersom detta motverkar möjligheten för förbränningen att röra sig uppströms (om strömningshastigheten är större än utbredningshastigheten på förbränningsfronten omöjliggörs baktändningen). Detta kan tex. uppnås genom att låta ventilerna vara öppna en kortare del av varvet, något som resulterar i ett högre tryck i blandningskammaren. Detta kräver att fjäderspänningen ökas, samt attnockarna förskjuts en liten bit, och har därför ännu inte testats.

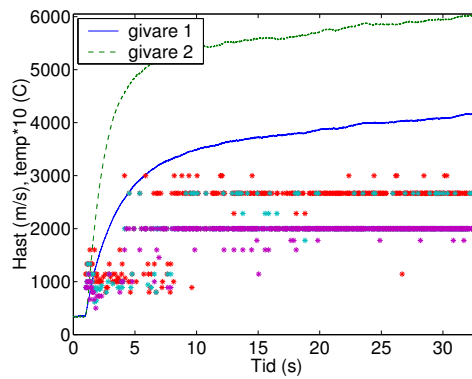
3.2 Resultat från körningar

En mängd olika parametrar har varierats i testmotorn:

- Ekvivalenstalet, Φ .
- Tändfördröjningen, denna har varierats mellan 5° och 108° .
- Öppningen på strypningen in till Smirnovkammaren. Diametern på öppningen varierades mellan 20, 25 och 30 mm.
- Flödet på renblåsningsluften. Här testades ingen renblåsning alls, samt regulatortryck på 3, 5 och 10 bar.
- Fyllnadsgraden.
- Tiden som motorn kördes.
- Frekvensen på motorn, i de flesta fallen användes 15 eller 20 Hz.
- Vilka insprutningsventiler som använts. I de flesta fall har tre eller fyra ventiler använts. Vid färre ventiler gör begränsningar i ventilspänningen att ventilerna börjar läcka (naturligtvis beroende på fyllnadsgrad och frekvens).

Förutom dessa parametrar var inte heller motorns temperatur densamma vid början av varje skott. Detta är en följd av att motorn är okylad, 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.

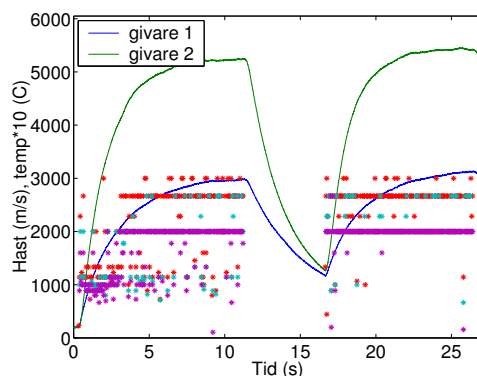
De resultat som framkommit hittills kan sammanfattas i följande punkter:



Figur 23: Temperaturer (givare 1 och givare 2) och hastighetsuppskattningar (*-markeringarna) från körningar av motorn i över 30 s. Illustration av uppstartningstiden.

- I de flesta av de fall där detonationer bildas kan en tydlig “uppstartningstid” noteras. Dvs. andelen detonationer var ofta betydligt lägre i början av körningen. Det har också varit tydligt att temperaturen på motorn är en väsentlig faktor, dvs. upp till en viss gräns är andelen detonationer större ju varmare motorn är.
- I en del av experimenten noterades 100% detonationer.
- Stabila detonationer bildades endast för de fall där blandningen som sprutades in motorn var stökiometrisk (en systematisk studie av fetare blandningar har *inte* genomförts).
- I ett försök med mager blandning ($\Phi = 0.80$) noterades spontandetonation (dvs. ej i anslutning till tändning av blandningen med tändstiftet).
- 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.
- Storleken på öppningen på strypningen in till Smirnovkammaren påverkade inte andelen detonationer i någon större utsträckning för de fall som testades.
- Eftersom motorn är okylad har den endast kunnat köras under kortare tider (mindre än 30 sekunder).

Resultaten från listan ovan illustreras nedan med resultat från några representativa körningar. I figur 23 visas de tre största hastighetsuppskattningarna samt temperaturen vid de två inre temperaturgivarna. För att kunna använda en gemensam y-axel för de bägge variablerna har temperaturen multiplicerats med faktorn 10. Noterbart för dessa data är att endast tändstift användes för att uppskatta förbränningsfrontens hastighet, samt att det mätsystem som användes arbetade med en samplingsfrekvens om 100 kHz, vilket ger en förhållandevis stor osäkerhet i hastighetsuppskattningarna. I detta försök opererade motorn i 20 Hz, vätgasluftblandningen strömmade in genom 4 ventiler, renblåsningsluft användes genom ventilen närmast tändstiftet och var inställd på 5 bar (vilket motsvarar ungefär 6% av motorns volym), blandningen var stökiometrisk, diametern på strypningen in till Smirnovkammaren var 30 mm, tändfördröjningen var ungefär 20° (2.8 ms vid 20 Hz) och full fyllnadsgrad användes. Uppskattningarna av

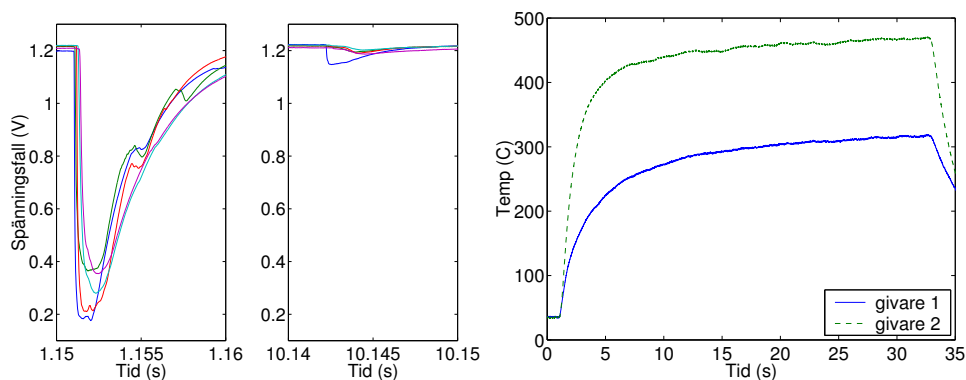


Figur 24: Effekten av avstängd vätgas under gång. Temperaturer i motorn (givare 1 och givare 2) samt hastighetsuppskattningar (*-markeringarna).

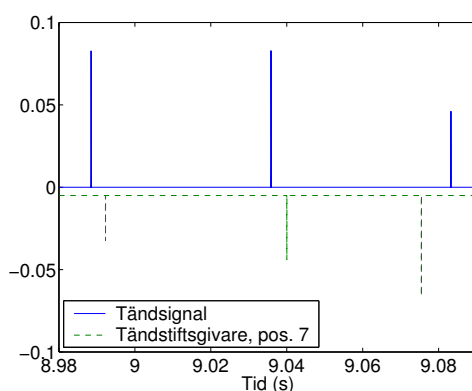
förbränningsfrontens hastighet illustrerar tydligt uppstartningstiden i processen. Kurvorna visar också att efter ungefär 10 sekunder bildades detonationer vid i stort sett samtliga pulser.

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 effekten från det ovan illustrerade fenomenet att andelen detonationer ökar när motorn värms upp gjordes ett försök där vätgasen stängdes av fem sekunder mitt i försöket. I detta försök användes samma data som i det ovan beskrivna, men med 33° tändfördröjning i stället för 20° (eftersom 33° visat sig vara något bättre än 20° vid 20 Hz). I figur 24 visas hastighetsuppskattningarna och temperaturkurvorna för detta försök. Kurvorna visar att andelen detonationer inte påverkas i någon större utsträckning av att vätgasen är avstängd under fem sekunder. Den första pulsen efter det att vätgasen sattes på igen detonerade inte, vilket däremot den andra gjorde. Detta antyder att det är temperaturen, och inte den något odefinierade blandningen i början av körningen, som är ansvarig för den ovan illustrerade uppstartningstiden.

För låga ekvivalenstal på bränsle/luftblandningen som sprutades in i motorn bildades endast undantagsvis detonationer. Signalerna från tändstiftsgivarna för dessa körningar illustrerade att förbränningen endast kunde karaktäriseras som en väldefinierad front i *början* av experimentet. I figur 25 visas signalerna från tändstiftsgivarna vid position 7 till 11 vid två olika tidsintervall, i början (den tredje pulsen) och en bit in i ett experiment då $\Phi = 0.8$. Dessutom visas temperaturkurvorna från de två temperaturgivarna i motorns inre. Vid detta experiment användes, förutom det lägre ekvivalenstalet, samma data som i försöket vars resultat visas i figur 23. 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 25b. Det är inte klart vad som orsakar denna förändring i ledningsförmåga, eller varför den inte är synlig vid stökiometrisk blandningar, men det är uppenbart att den har med den ökande temperaturen att göra.



Figur 25: Spänningsfall över tändstiftsgapet vid två olika tidsintervall och temperaturer i motorn (givare 1 och givare 2) vid skott med $\Phi = 0.8$.

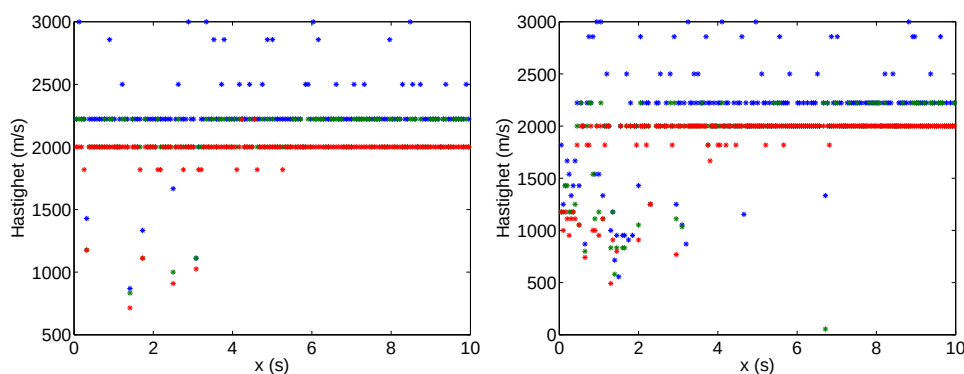


Figur 26: Illustration av spontantändning, i form av detonation och resulterande i baktändning för experiment med mager blandning ($\Phi = 0.8$).

Betydelsen av renblåsningen undersöktes genom att använda samma ekvivalenstal ($\Phi = 0.8$) och övriga inställningar som i försöket ovan, men med mindre renblåsning. I ett försök var renblåsningen inställd på 3 bar och i senare 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 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 visar att blandningen detonerade över en stor del av motorn. Vid den aktuella körningen var motorns frekvens 21.11 Hz (dvs. tiden mellan tändpulserna var 0.0474 s). I figur 26 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



Figur 27: Hastighetsuppskattningar från körningar med insprutning genom 4 (vänstra bilden) och 3 ventiler (högra bilden).

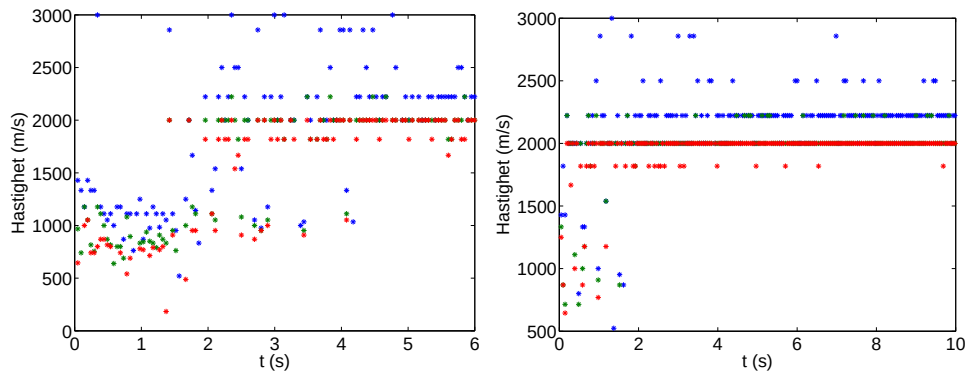
första pulserna i figuren kan en tydlig fördröjning mellan tändningen och passagen av förbränningsfronten noteras. I den sista pulsen däremot är det tydligt att förbränningsfronten passerade position 7 *innan* tändningen aktiverades. Som nämnts ovan var det endast denna sista puls som detonerade, och i anslutning till denna puls baktände motorn. Detta förlopp visar att det är möjligt att utnyttja motorns dynamik – motorns temperatur, avgaserna från den föregående pulsen, eller en kombination därav – för att förenkla initieringen av detonationen. I detta specifika fall var initieringsenergin noll (detonationen startade innan tändningen), men då motorn baktände är det inte möjligt att dra några slutsatser angående *hur* detta fenomen ska utnyttjas. Däremot motiverar resultatet fortsatta studier med förbättrade mätresurser (temperatur- och koncentrationmätningar i fältet).

Exempel på inställningar som snabbt gett upphov till stor andel detonationer visas i tabellen nedan

antal ventiler	frekvens (Hz)	fyllnadsgrad	temp intervall (°C)
4	15	133%	39-47
3	20	100%	42-51
2	20	75%	36-46
2	20	75%	39-47

I samtliga av dessa fall användes stökiometrisk blandning, och regulatorn på renblåsningen var inställd på 5 bar (vilket ungefär mostvarar 6% av motorns volym vid 20 Hz och 8% vid 15 Hz). Hastighetsuppskattningar från dessa körningar är redovisade i figurerna 27 och 28. Kurvorna i dessa figurer illustrerar att temperaturen på motorn är en viktig faktor, dels genom uppstartningstiden, men också i figur 28 där uppstartningstiden blev betydligt kortare då motorn var varmare från start. Tändstift vid mätpunkter 12, 20, 28 och 36 cm från motorns öppna ände användes vid hastighetsuppskattningarna i dessa försök, men till skillnad från de tidigare försöken användes ett annat mätsystem där samplingshastigheten var 500 kHz. Hastighetsuppskattningen från signalerna för givarna närmast utloppet är röda, därefter gröna och slutligen blåa för givarna vid mätpunkterna 28 och 36 cm från motorns öppna ände.

Trender som har noterats under ett förhållandevis stort antal experiment är att andelen detonationer blir större då färre ventiler används, samt då hastigheten på bränsle/luftblandningen som sprutas in blir större. Till exempel blir andelen detonationer mindre vid låga fyllnadstal och större vid höga.



Figur 28: Hastighetsuppskattningar från körningar med insprutning genom 2 ventiler. I körningen som resulterade i uppskattningarna i den högra bilden var motorn varmare från start.

För fallet med 2 ventiler (figur 28) användes en fyllnadsgrad av 75%. Detta innebär (idealiserat) att motorn endast borde vara fylld av vätgas/luft fram till och med 24 cm från motorns öppna ända. Trots detta visar kurvorna i figuren att detonationshastigheter detekteras närmare motorns öppning. Möjliga förklaringar till detta beteende är:

- Då trycket i blandningskammaren är förhållandevis lågt (mindre än 2 bar), och då bränsle/luftblandningen inte sprutas in från motorns slutna ända kommer det kalla bränslet i högre grad att blandas med förbränningsprodukterna från den föregående pulsen (och även, i förekommande fall, till viss del med renblåsningsluften).
- Gasblandningen hettas upp innan tändning och så att säga “expanderas” ut ur motorn.
- Detaljer i motorn blir så heta att motorn spontantänder (tex. som i exemplet beskrivet ovan med $\Phi = 0.8$ och utan renblåsning), och delar av mediet “brinner upp” innan antändning.

För närvarande går det inte att avgöra den faktiska sammansättningen på den gasblandning som finns i motorn vid tidpunkten för tändningen, men det är uppenbart att den kommer att innehålla en mer utspädd blandning än den som sprutas in i motorn. Detta är också en orsak till att de kraftmätningar som genomförts visar på en lägre dragkraft – och därmed också specifik impuls – än den förväntade för detonationer i blandningar av den sammansättning som sprutas in i motorn. Ett sätt att studera detta vore att gradvis minska fyllnadsgraden tills ingen detonation detekteras i slutet av röret och notera hur dragkraften (och den specifika impulsen) utvecklas. Om vi i de genomförda experimenten använt för hög fyllnadsgrad (eldat för kråkorna) borde dragkraften inte påverkas, och den specifika impulsen öka, då fyllnadsgraden minskar. Problemet med detta förfarande är att lägre fyllnadsgrad ger upphov till lägre hastigheter hos de inströmmande gaserna, och detta har visats leda till större svårigheter för detonationerna att bildas. För att denna studie ska vara meningsfull att genomföra måste därför motorn modifieras så att ett högre tryck kan användas i blandningskammaren samt så att ventilerna kan vara öppna en mindre del av varvet.

4 Diskussioner och fortsatt arbete

Ett flertal numeriska simuleringar har genomförts, och resultaten från dessa har visat att radikaler som är närvarande från förbränningsprodukterna från en puls kan ha en stor betydelse när detonationen i den följande pulsen ska initieras. Eftersom radikalernas "överlevnad" är starkt kopplad till temperaturen i fältet har simuleringarna indirekt även visat att motorns temperatur är en betydelsefull parameter.

På grund av problemställningens komplexitet är simuleringar av initieringar av detonationer väldigt krävande, och det är omöjligt att ta fram kvantitativt riktiga resultat för denna typ av problem (ju "större" datorer desto mer realistiska problem kan behandlas). För att kunna erhålla någon typ av resultat har därför olika förenklingar införts i problemställningen, och den viktigaste av dessa är att blandningsfasen mellan den kalla bränsle/luftblandningen och de heta restprodukterna *inte* har simulerats. I stället har det antagits att själva blandningen har ägt rum momentant (och därmed utan någon form av reaktion under själva blandningen). Det är uppenbart att detta inte är något som inträffar i hela volymen i den verkliga motorn, men det är inte otänkbart att det kan finnas isolerade områden, kanske i anslutning till någon av motorns hetare detaljer, där detta antagande kan vara uppfyllt till en större del. Insprutningen och den efterföljande omblandning är därför ett moment där det bedöms att fortsatta studier skulle vara betydelsefulla.

Den kod som i de flesta fall har använts i simuleringarna har kalibrerats genom att räkna på de cellstrukturer som bildas då en detonation rör sig genom ett medium bestående av vätgas, syre och argon vid ett förhållandevis lågt tryck. Resultaten har jämförts med resultat från simuleringar från litteraturen och funnits stämma väl överens. De celler som bildas är mindre än de som uppkommer i experiment med samma gasblandning, något som kan förklaras av att hänsyn till värmeförluster till väggarna *inte* tagits i beräkningarna (något som leder till "svagare" detonationer och större celler). Det vore av intresse att fortsätta dessa simuleringar för blandningar även vid andra tillstånd.

Ska motorn fås att arbeta med andra typer av bränslen än vätgas (kinetiken för en väte-syreförbränning är förhållandevis "enkel") behöver dels modeller för kinetiken för det aktuella bränslet tas fram, samt, för effektivitetens skull, förenklas så att tidsåtgången vid simuleringar med detta bränsle inte blir allt för stor.

Baserat på de resultat från de numeriska simuleringarna som indikerar att de radikaler som finns i de heta restprodukterna kan förenkla initieringen av den följande pulsen har en pulsdetonationsmotor konstruerats och testats med vätgas/luft som bränsle. Till skillnad från en "konventionell" pulsdetonationsmotor där bränsle/luftblandningen sprutas in genom en ventil i motorns framkant används i stället ett antal ventiler placerade på olika positioner i motorns längsriktning. Vidare har graden av renblåsning minskats från vad som är brukligt. Motivationen bakom dessa åtgärder är att försöka utnyttja radikalerna i restprodukterna från den föregående pulsen för att underlätta initieringen av detonationen i den följande pulsen, något som i enlighet med resultaten från simuleringarna visat sig kunna vara fördelaktigt. Den motor som konstruerats och testats använder ventiler som öppnas och stängs med hjälp av kamnocker på en vevaxel driven av en hydralmotor. Bränsle/luftblandningen som sprutas in i motorn förblandas i en blandningskammare. Det aktuella systemet har två betydelsefulla begränsningar: ventilerna börjar läcka vid ett övertryck av ungefär 2 bar, och insprutningstiden är given av motorns frekvens och formen på nackarna (dvs. för att förändra insprutningstiden för en given frekvens måste nya nackar tillverkas). Detta innebär att effekterna av variationer i insprutningshastighet och insprutningstid inte har kunnat studeras, faktorer

som med stor sannolikhet påverkar motorns funktion.

Motorn har – under vissa förutsättningar – fått arbeta med regelbundna detonationer. Dock har en lägre dragkraft än den förväntade mätts upp. Det är inte utrett vad som orsakar detta, men en trolig förklaring är att den faktiska bränsleblandningen i motorn vid tändningen har ett lägre energiinnehåll än den blandning som sprutas in i motorn (eftersom i syfte att utnyttja radikalerna från den föregående pulsen vätgas/luftblandningen som sprutas in till viss del blandas med de heta restprodukterna). En annan faktor är att de turbulensgenererande insatserna i motorn (turbulator och strypning) ger upphov till ett internt motstånd vilket i sin tur sänker dragkraften. Dessutom kommer gaserna som sprutas in i motorn att värmas upp, och på grund av detta till viss del “expandera” ut ur motorn.

Ett flertal parametrar har varierats, och resultat från körningarna illustrerade ett tydligt samband mellan temperaturen i motorn, och andelen av pulserna som detonerade. I de flesta fall där stabila detonationer kunnat 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 i försök där tillförseln av vätgas stängdes av ett fåtal sekunder när motorn hade varit i drift i ungefär 10 sekunder. Andelen detonationer påverkades inte i någon större utsträckning av avbrottet, vilket indikerar att uppstartningstiden är en följd av uppvärmningen av motorn.

Frågan om radikalerna från den föregående pulsen underlättar initieringen av den följande går inte att besvara från de genomförda experimenten. I fallet då vätgasen var avstängd en kort period detonerade inte den första pulsen efter det att vätgasen satts på igen, men väl den andra, något som troligen kan förklaras av att vid den första pulsen efter avbrottet så har endast en mindre del vätgas sprutats in i motorn, men det går inte att utesluta att restprodukterna från den första, icke-detonerade pulsen underlättar initieringen av detonationen i den följande.

På grund av turbulatorn och strypflänsen i den främre delen av motorn kan det heller inte uteslutas att det kan finnas områden, t.ex. i anslutning till någon av motorns turbulensgenererande delar (vilka snabbt blir väldigt heta), där blandningen innehåller förhöjda halter av radikaler även efter några sekunder utan förbränning. För att ytterligare studera detta är det nödvändigt att komplettera mätutrustningen med utrustning så att det blir möjligt att detektera kvantiteten av en eller flera av de radikaler som bildas i förbränningsprocessen.

Försök gjordes med blandningstalet $\Phi = 0.8$ hos den bränsle/luftblandning som sprutades in i motorn. I detta fall detekterades endast ett fåtal detonationer. 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 klarlagt vad detta beror på, och för att studera detta är det nödvändigt att kunna detektera mängden av åtminstone en av de radikaler som bildas som en följd av reaktionen.

För blandningstalet $\Phi = 0.8$ gjordes även 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 mo-

torn. 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. Dvs. i detta fall kunde det verifieras att även för magra blandningar är det möjligt att utnyttja motorns dynamik för att underlätta initieringen av detonationen (*hur* detta ska göras är en annan fråga).

Exemplen ovan visar att temperaturen i motorn är betydelsefull, men som redan nämnts är det med den aktuella mätutrustningen inte möjligt att mäta vare sig temperaturen, eller koncentrationen av radikaler i fältet. En naturlig fortsättning av det experimentella arbetet vore därför att komplettera mätsystemet så att det även är möjligt att detektera någon eller några av de radikaler som förekommer (tex. OH), samt att mäta temperaturen i strömningsfältet.

Resultaten från de genomförda experimenten har visat att andelen detonationer blir högre om färre ventiler används, eller om fyllnadsgraden ökas. Båda dessa åtgärder gör att strömningshastigheten på den bränsle/luftblandning som sprutas in i motorn ökar, men de påverkar även andra egenskaper i strömningsfältet. För att renodla effekten av just insprutningshastigheten vore det därför värdefullt om denna kunde ökas, utan att förändra vare sig antal ventiler eller fyllnadsgrad. Detta skulle leda till bättre omblandning mellan bränsle/luftblandningen och restprodukterna från den föregående pulsen (i bättre överensstämmelse med den "momentana" omblandning som antagits i de numeriska simuleringarna), samt en högre grad av turbulens initialt (turbulensen är en viktig faktor som gör att en övergång från deflagration till detonation blir snabbare). För att genomföra detta behöver motorn modifieras, ventilerna ska vara öppna en mindre del av varvet, och ventilmjadrarna behöver spännas så att ventilerna kan hålla för ett högre tryck utan att läcka.

Eftersom bränsle/luftblandningen sprutas in genom flera ventiler i motorns längsled (i syfte att blandas med restprodukterna, och därmed utnyttja radikalerna för att göra blandningen lättare att detonera) är sammansättningen på den blandning som faktiskt används inte känd (det är inte heller troligt att blandningen är homogogen). På grund av gasernas tröghet har motorn (liksom vid all typ av pulserande förbränning) även en viss självvandande effekt, dvs. i slutet av varje puls har en överexpansion gjort att luft sugits in genom motorns öppna ände. Detta innebär att förutom restprodukter från den föregående pulsen kommer bränsle/luftblandningen som sprutas in i motorn även att blandas med luft (och därmed syre). För att den blandning som faktiskt antänds i motorn ska vara stökiometrisk (en stökiometrisk blandning är i regel lättare att detonera än en som är mager eller fet) måste därför den blandning som sprutas in ha ett blandningstal större än 1 (fet blandning). Då vi inte har möjligheten att avgöra blandningstalet på den blandning som antänds, får andra metoder användas för att studera detta. En metod, som ännu inte har testats (något som borde ha gjorts för länge sedan), är att göra en variation av två parametrar där blandningstal (större än 1) och fyllnadsgrad (mindre än 1) varieras, med en strävan efter att hålla övriga parametrar konstanta (så långt det är möjligt, variationen i fyllnadsgrad kommer även att medföra att hastigheten på mediet som sprutas in i motorn varierar – vilket alltså också är av stor betydelse). Dvs. för en uppsättning blandningstal (tex. 1.2, 1.4 och 1.6) varieras fyllnadsgraden (tex. 0.5, 0.7 och 0.9) och förutom hur snabbt detonationer bildas studeras även hur långt bak i röret förbränningen äger rum i detonationsform. Vidare studeras även dragkraften, och den specifika impulsen – av vilka det sista måttet är det som bäst sammanfattar effektiviteten på motorn (en högre dragkraft kan uppnås genom att öka frekvensen). Målsättningen med en sådan studie är att hitta det blandningstal på gaserna som sprutas in i motorn som resulterar i en blandning i motorn som är så

lätt som möjligt att initiera – vilket alltså approximativt bör mostvara en stökiometrisk blandning i motorn – samt att avpassa fyllnadsgraden så att inga oförbrända bränslegaser försvinner ut ur motorn. Dvs. med detta förfarande är det möjligt att optimera både initieringsegenskaperna och den specifika impulsen.

Vid något av de första försöken upptäcktes att motorn baktände, dvs. att förbränningen spred sig till blandningskammaren. I syfte att motverka detta utnyttjades det första insprutningshålet, det som sitter närmast tändstiftet (4 cm från frontgaveln), till att leda in renblåsningsluft. Förfarandet hade önskvärd effekt, och tendensen för baktändning minskade. Det innebar dock att den första ventil genom vilken bränsle/luftblandningen sprutades in i motorn är belägen 12 cm från frontgaveln där tändstiftet är placerat. Detta innebär att blandningen vid tändstiftet blir mer utspädd än vad den är i övriga delar av fältet, och leder troligen till att initieringen av detonationen blir försvårad. Ett bättre förfarande hade varit att istället leda in renblåsningsluften genom tryckhålet på motorns frontgavel (något som hade krävt ett större mått av modifiering). Men som nämnts ovan kommer risken för baktändning att reduceras om inströmningshastigheten ökar (genom förkortad öppningstid), och det är möjligt att det efter en sådan modifiering inte längre finns något behov av renblåsning.

5 Slutsatser

Pulsdetonationsmotorn kan – på grund av att den har potentialen att vara “bättre och billigare” – komma att ersätta andra motortyper. Den övergripande frågeställningen för projektet har varit att utreda om detta är möjligt, samt i så fall i vilka tillämpningar.

Komplexiteten i de relevanta fysikaliska processerna har gjort att denna frågeställning ännu inte kan besvaras, och i projektet har fokus varit inriktat på initieringen av detonationen, vilket är det svåraste delmomentet i motorprincipen, och något som måste utredas innan frågeställningarna ovan kan besvaras. Kan detonationen initieras på ett enkelt och billigt sätt kommer motorn att få ett stort användningsområde, kan den inte det kommer användningsområdet att bli begränsat.

Internationellt har stora ansträngningar gjorts för att realisera principen i praktiska tillämpningar, trots detta finns ännu inte någon motor baserad på denna princip i flygande tillämpningar.

På grund av bristen på framgångar med “konventionella” metoder har projektet studerat en till viss del annorlunda metod för att starta detonationen. Med hjälp av simuleringar har det visats att de radikaler som finns närvarande i slutet av en puls kan underlätta initieringen av den följande. Resultaten från dessa simuleringar grundar sig av nödvändighet på vissa förenklingar i modelleringen av problemställningarna, men trots detta har en motor baserad på dessa ideer konstruerats, byggts och testats. Motorn kan fås att arbeta med detonationer under vissa förutsättningar, men det har ännu inte visats att den vid FOI studerade initieringsmetoden innebär att processen har förenklats – något som möjligen kan bero på att motorn lider av en del praktiska begränsningar. Då en viss PDE-verksamhet kommer att bedrivas även 2006 kommer effekten av dessa begränsningar att undersökas närmare.

Referenser

- [1] Nicholls, J. A., et. al., ‘Intermittant Detonation as a Thrust-Producing Mechanism’, *Jet Propulsion*, **27**, 534-541, (1957).

- [2] Magnus Berglund, Jon Tegnér & Niklas Wingborg, 'A Contemporary Study of Research on Tactical Missile Propulsion', FOI-R-1706-SE, September 2005, ISSN 1650-1942.
- [3] J. K. Tegnér, 'Initial studies of the Pulse Detonation Engine', Scientific report, FOA-R-98-00795-310-SE, June 1998, ISSN 1104-9154.
- [4] Jon Tegnér, 'An Introduction to the Pulse Detonation Engine', Novel Aero Propulsion Systems International Symposium, September 2000.
- [5] Jon Tegnér & Björn Sjögren, 'Numerical Investigations of Deflagration to Detonation Transitions', Combustion Science and Technology, vol. 174, no. 8, 153-186, 2002.
- [6] Jon Tegnér, 'Effects of Radicals on Initiations of Detonations in a Pulse Detonation Engine', FOI-R-0759-SE, December 2002, ISSN 1650-1942.
- [7] Jon Tegnér & Stefan Olsson, 'Försök med PDE med multipel insprutning', FOI-R-0925-SE, september 2003, ISSN 1650-1942.
- [8] 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.
- [9] Zel'dovich, Y.B., Gelfand, B.E., Tsyganov, S.A., Frolov, S.M., and Polenov, A.N., 'Concentration and Temperature Nonuniformities of Combustible Mixtures as Reason for Pressure Waves Generation', Progress in Astr. and Aero., 114:99-123 (1988).
- [10] Khokhlov, A.M., Oran, E.S., and Wheeler, J.C., Combustion and Flame. 108:503-517 (1997).
- [11] Sjögren, B., and Tegnér, J., ISABE 99-7128 (1999).
- [12] J. K. Tegnér, 'Properties of Simple Model Problems for Reacting Gas Flows'. Mathematical Methods in the Applied Sciences, Vol. 17, 1994.
- [13] J. K. Tegnér, 'Properties of Detonation Waves'. Mathematical Methods in the Applied Sciences, Vol. 19, 1996.
- [14] 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).
- [15] Tegnér, J.K., 'Initial studies of the Pulse Detonation Engine', Scientific report, FOA-R-98-00795-310-SE, June 1998, ISSN 1104-9154.
- [16] Tegnér, J.K., 'Experiment on predetonators for PDEs', FOI-R-0123-SE, ISSN 1650-1942 (2001).
- [17] Lee, J.H., and Shepherd, J.E., *Major Research Topics in Combustion*, ICASE/NASA LaRX series, Hussaini, M.Y., Kumar, A., and Voight R.G. (eds), 1991, p. 438.

- [18] Oran, E.S., J.W. Weber, Jr., E.I. Stefaniw, M.H. Lefebvre, and J.D. Anderson, Jr. 'A numerical study of a two-dimensional $\text{H}_2\text{-O}_2\text{-Ar}$ detonation using a detailed chemical reaction model'. *Combustion and Flame*. 113:147-163. (1998).
- [19] Christopher A. Eckett, 'Numerical and Analytical Studies of the Dynamics of Gaseous Detonations', Thesis, California Institute of Technology, (2001).
- [20] R. Farinaccio, P.G. Harris, and R.A. Stowe, 'Turbulent Flow Effects on DDT Run-up Distance for a Pulse Detonation Engine', AIAA 2004-3917, 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit 11-14 July 2004, Fort Lauderdale, Florida.