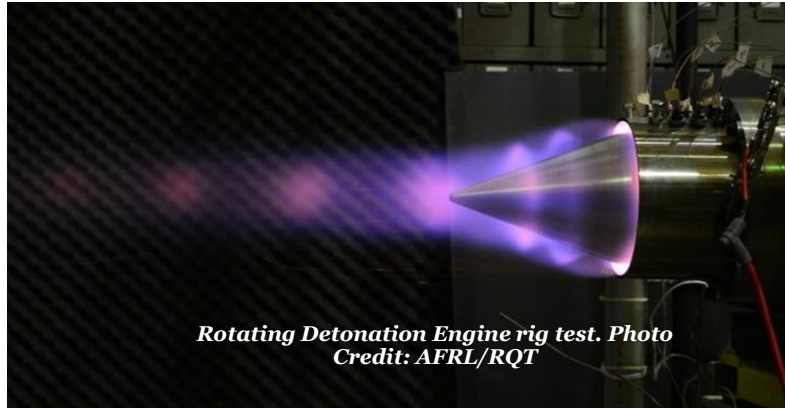


Detonationsmotorer

C. Eriksson

Som en del av strävan efter bättre framdrivningsprestanda förblir förbättrad förbränningseffektivitet en ambition för utvecklare av jetmotorer och raketer. Även om de ännu inte har visat sin fulla termodynamiska potential, genomgår roterande detonationsmotorer (RDE) tester för kompakta höghastighetsmissiler till förbättrade jet- och raketmotorer.



Rotating Detonation Engine rig test. Photo Credit: AFRL/RQT

Konceptet för RDE utvecklades på 1950-talet av den framlidne James Arthur Nicholls, professor vid University of Michigan:s institution för flygteknik (numera flyg- och rymdteknik). Liksom många innovationer inom ingenjörskonsten var hans idé resultatet av att han ställde en oortodox fråga. När han lade märke till hur trasiga raketmotorer tenderade att explodera fick det honom att undra: Tänk om sådana explosioner användes i en motor för att driva raketer?

En konventionell raketmotor använder turbopumpar för att skicka en trycksatt blandning av bränsle och syre in i en brännkammare där blandningen antänds och brinner via deflagration – i princip samma förbränningsprocess som används av bilmotorer eller jetturbiner. Denna deflagration frigör energi, som kan användas för att driva en mekanisk anordning (t.ex. en turbin) eller för att skjuta en raket uppåt. En Rotation Detonation Engine RDE, å andra sidan, förbränner sitt bränsle genom detonation snarare än deflagration.

I RDE-förbränningsprocessen bygger detonationsvågen upp sitt eget tryck i stället för att förlora tryck som sker i konventionella kompressorutrustade jetmotorer. Resultatet är en högre grad av effektivitet när det gäller att dra energi ur bränslet eftersom det i själva verket fungerar som sin egen kompressor även när det frigör energi. En detonationsmotors förbränningshastighet är mycket snabbare än för konventionella turbinmotorer.

I dagens deflagrationsbaserade gasturbin- och raketmotorer rör sig flamfronten med långsamma 10 m/s, vilket ger reaktanterna tid att spridas och resulterar i ofullständig bränsleförbränning. Stötvågen i en detonationsbaserad motor rör sig överljudsmässigt med upp till 2 000 m/s, vilket ger lite tid för expansion. Kompressionskrafter från stöten orsakar snabb uppvärmning och förbränning av en del av blandningen, vilket förbättrar den totala bränsleeffektiviteten.

Även om forskare har utforskat flera tillvägagångssätt för förbränning med tryckförstärkning, såsom förbränningsvågrotorer, är detonationsbaserade enheter fortfarande de mest lo-

vande. Dessa följer två huvudvägar: RDE och pulsdetonationsmotorer (PDE). Den senare består av en enda eller flera detonationskammare fyllda med en bränsle/oxidationsmedelsblandning. Detonation och dess tryckökning driver ut avgaserna från kammaren och genererar dragkraft. Färska reaktanter matas sedan in i kammaren för att upprepa cykeln.

Fokus för de flesta detonationsbaserade avancerade framdrivningsarbetena har sedan skiftat till RDEs, där detonationsvågor kontinuerligt roterar runt en ringformig förbränningskammare med öppen ände. Matning av bränsleblandningen är en serie av insprutningsportar vid brännkammarens inlopp. I fallet med en roterande detonationsraketmotor (RDRE) matas bränsle från turbopumpens ände av kammaren. För att starta processen tänds en höghastighetslåga blandningen och utlöser en detonationsvåg.

När vågen färdas runt kammaren förbrukar den bränslet, vilket skapar ett högtrycksområde i dess kölvatten. Det området, begränsat av vågfronten och geometrin hos RDE, expanderar till slut och lämnar kammaren. Färskt bränsle injiceras bakom vågen, vilket förbereder den delen av kammaren för att upprätthålla vågen. Denna process producerar kvasi-kontinuerlig dragkraft genom högfrekventa rotationer, och med en jämn bränsletillförsel blir den självförsörjande.

Eftersom RDE:er också är relativt enkla mekaniskt, utan rörliga delar, är de en av de mest lovande tekniska vägarna för att uppnå förbränning med tryckförstärkning. Experimentella riggtester utförda runt om i USA sedan 2000-talet – på platser som Air Force Research Laboratory (AFRL), Office of Naval Research Laboratory, Energy Departments National Energy Technology Laboratory, GE Research och RTX – har visat deras potential att öka termodynamisk effektivitet.

Ref: [Need For Speed Pushes Rotating Detonation Development](#)

Dagens jetmotorer har en Carnot-cykel energiomvandling från bränsle/luft till förbränningsgaser vid konstant tryck "Constant pressure combustion". Verkningsgraden att omvandla kemisk energi till mekaniskt arbete beror då på vid vilket tryck förbränningen sker. Ju högre tryck desto mera av den kemiska energin kan omvandlas till mekanisk. Så en jetmotors verkningsgrad ökar med brännkamartrycket. En villapanna som eldar i atmosfärstryck kan inte omvandla nämnvärt med kemisk energi till mekaniskt arbete utan värmen pyser ut utan att ha utfört mekaniskt arbete.

En kolvmotor fungerar enligt principen "Constant volume combustion" där man kan styra tryckkurvan i cylindern med hjälp av bränsleinsprutningen för att få önskad tryck/temp-kurva, de moderna dieselmotorerna har upp till sju insprutningar under förbrännings-cykeln för att styra temp/tryck kurvan under expansions-slaget.

Formula 1 F1 motorer har idag "Homogeneous charge combustion", där i princip förbränningen sker i en enda knackning vid övre dödpunkten förenklat för att då förbränna vid max tryck och sedan låta förbränningsgaserna trycka ned kolven.

Formula 1 gillar förkortningar som KERS, ERS AND DRS. En som kommer starkt är HCCI Homogeneous Charge Compression Ignition. HCCI är en förbränningsprocess, som kombinerar diesel och bensinmotorernas förbränning. Trycket ökar via en högtrycksbränsleinsprutning i cylinder, denna skapar en förbränningsreaktion utan att behöva tändstift.

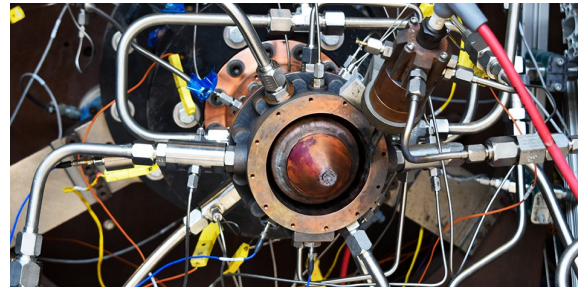
I F1 används MAHLE's Jet Ignition system för att förbättra förbränningsprocessen. Den liknar HCCI-processen men bränsleinsprutningen kan styras finare ihop med ett tändstift för att öka området då "laddningen" tänds. MAHLE Jet Ignition system använder en tändkammare som sprutar komprimerad bränsle in i cylindern, som då tänds. Dock vid icke optimala blandningar så används tändstift för att tända blandningen.

F1-reglerna säger att tändstiftet endast får tända fem gånger per expansionscykel, men användandet av en jet ignitor kan förlänga förbränningen ihop med lokal spontanförbränning. Noggrann design av injector, jet ignitor, spark plug, cylinder och kolvhuvud medför tändning av både fet och mager blandning i cylinder som uppstår pga olika gaspådrag.

Så man jobbar på ett liknande sätt i RDE motorer för att få en lokal tryckökning i förbränningszonen genom att öka trycket lokalt med att låta en eller flera stötvågor rotera i brännkammaren eller i efterbrännkammaren för att öka trycket under förbränningen.

Man vill även använda RDE förbränning i raketmotorer där tryck och ljudvariationer runt raketmunstycket inte träffar ledskenor eller ebk utloppsmunstycke. Man känner teorin sedan decennier tillbaka att kunna förbränna i stötvågor som medför förbränning under lokalt högre tryck och därmed öka verkningsgraden genom en explosiv förbränning istället för en diffusionsförbränning deflagration som sänker trycket lite. Detonationen formar en stötvåg som begränsar gasens expansion, och i likhet med constant volymförbränning begränsar volymen för förbränning och därmed ökar trycket.

I dagens deflagration-baserade gas turbiner och raketmotorer rör sig flamfronten sakta med 10 m/sec. Detta tillåter förbränningsprodukterna att spridas och orsaka icke komplett kemisk



Purdue University photo/Alan Cesar

förbränningsreaktion. I en explosionsbaserad förbränning rör sig flamfronten snabbare upp till 2000 m/sec, som ger liten tid för expansion. Kompressionskrafter från stötvågen medför snabb upphettning och förbränning i en större mängd av bränsleblandningen, vilket ökar verkningsgraden.

Man har gjort experimentmotorer med flera explosionsrör som brännkammare (pulsdetonationsmotorer) men kombinationen av höga pulserande tryck i höga temperaturer medför stor belastning på komponenter som brännkamarhus, ledskenor och turbinblad, som därmed får kort livslängd.

Man har då bytt focus mot RDE motorer då stötvågen eller stötvågor kontinuerligt går runt i brännkammaren som då kan ha öppna ändar åt båda håll. Bränsleinsprutningen kan då ske i kompressorinloppet eller i brännkammaren i vinklar som stämmer med stötarnas vinklar. Då stötvågen går runt i brännkammaren förbränner den bränslet och skapar en tryckhöjning efter stötvågen jämfört med innan stöten passerade och tände luft-bränsleblandningen.

Området begränsas då av stötvågen och brännkammaren och förbränningsgasen rusar mot utloppet som i en vanlig motor/ebk eller raketmotor

Bränsle sprutas in bakom vaken och blandas med färsk luft som sedan den roterande stötvågen sveper genom och förbränner. Denna process producerar en "kvasi-kontinuerlig" dragkraft genom den höga frekvens då stöten roterar genom brännkammaren. Man lockas av att den är mekaniskt simpel med inga rörliga delar.

"Värdet ligger i effekttätheten", säger Chris Hugill, chef för Pratt & Whitneys GatorWorks enhet för prototyper, där RDE-utvecklingen har pågått i flera år. "När man tittar på att producera kraft på ett sätt som är både kompakt och lätt har det många fördelar för en rad olika tillämpningar och framtida system, som vi tittar på."

"Roterande detonationsförbränning är beroende av överljudsförbränningen och förmågan att producera och kontrollera detonationsvågen för att ge dragkraften", säger Hugill. "Hur vi gör det och validerar att vi får de resultat vi förutspådde är den tekniska utmaningen. Det är en utmaning vid testning och instrumentering, samt att anpassa designfunktioner till önskat resultat."

"Vi närmar oss, men vi har ännu inte uppnått en mätbar tryckökning för en av dessa saker", säger Daniel Paxson, en flygforskningsingenjör och RDE-specialist vid NASA:s Glenn Research Center i Ohio. "En av de frustrerande sakerna med nästan alla tryckförstärkningsförbränningsystem är att de är mekaniskt enkla, men de är fluidiskt otroligt komplicerade, så de blir väldigt svåra att analysera och optimera."

"En av de stora tekniska utmaningarna som vi bara har börjat fördjupa oss i – även om vi har vetat om detta i flera år – är att turbiner som regel inte gillar instabilitet", fortsätter Paxson. Flödesojämnheter medför strukturella och aerodynamiska problem. "Du har en fundamentalt instabil process på gång, och den kan ge dig massor av tryckökning, men om allt kastas bort av den ineffektivitet som du orsakar turbinen, var har du då hamnat?"

Även om medeltemperaturerna är desamma som för alla andra förbränningsanordningar, konstaterar han: "Du har den här kombinationen av hög hastighet och höga tryck och höga temperaturer, så det finns mycket värmeöverföring."

Att kontrollera detonationsprocessens grundläggande funktion är också problematiskt och kräver innovativa lösningar, säger Paxson. "Du har en enhet utan rörliga delar, du försöker föra in bränsle och luft, och du vill att allt ska flöda axiellt och in i enheten utan några förluster. Sedan kommer den här detonationen, som naturligtvis också försöker driva flödet tillbaka åt andra hållet".

Då ingen mekanisk ventil klarar belastning i en frekvens av cirka 10 KHz, återstår endast en strömningslösning för att hindra att tryckökningen från förbränningen går uppströms. Så man försöker skapa "aero-dioder" som stoppar att trycket och förbränningsgasen går åt fel håll. Man vill få luft och bränsle att blandas mycket fort på en kort sträcka.

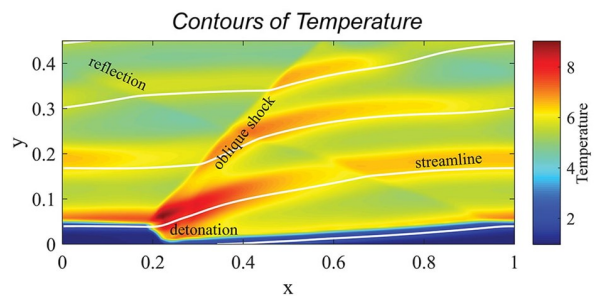
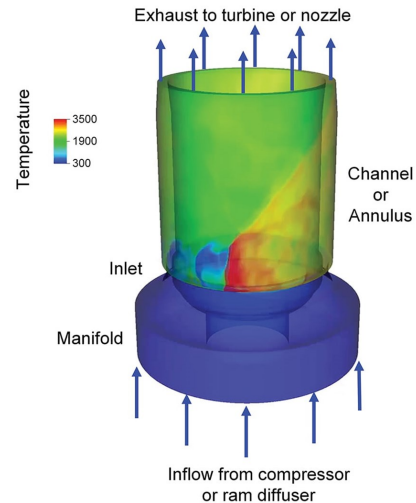
Så för att förenkla så passar RDE bäst för efterbrännkammare, som idag lider av förbränning under lågt tryck. Utloppet av ebk har inga turbiner eller ledskenor som kan skadas utan det är en kontrollerad utloppsarea för att maximera gashastigheten ut.

Då man vill ha en snabb blandning av luft-bränsle samt en snabb flamhastighet så passar det väteförbränning bra.

Man har inte samma problem som i en scramjet (Supersonic combustion ramjet) där man konstant är i överljud och måste få in bränslet i luftströmmen utan att det skapar en rak stöt och man hamnar i underljud.

Man kan tänka sig en mindre inte så dyr jetmotor som driver en UCAV "Unmanned Combat Air Vehicle" som flyger i rote med det bemannade moderskeppet. Då gruppen ska anfalla i överljud så tänds alla UCAV's sina RDE ebk's och följer moderskeppet i hög hastighet tills de får sina anfallsorders och utför uppdragen för att sedan återsamlas och följa med moderskeppet hem.

Både de två nya Europiska jaktplanen Tempest och FCAS Future Combat Air System (FCAS), som utvecklas nu kommer att ha UCAV's. Dock är deras prestanda, beväpning, självförsvar, mål-identifiering med mållåsning för sina vapen och kommunikationssystem okända och nuvarande visade UCAV's ser ut att vara endast för underljudsflygning och markattack.



Future Combat Air Systems (FCAS): RAF:s modell av Tempest-flygplan som opererar med "lojale wingman"-drönare.

USAF Next Generation Air Dominance fighter (NGAD) är ett program från det amerikanska flygvapnet (USAF) för att ersätta F-22.

Ett sjätte generationens stridsflygplan kommer att utgöra kärnan i den nätverksanslutna NGAD-systemfamiljen. Det kommer att kompletteras med flera bemannade flygplan, lojala obemannade flygfarkoster av wingman-typ och avancerade lednings-, kontroll- och kommunikationssystem.

NGAD-jaktplanet beräknas kosta så mycket som 300 miljoner dollar per flygplan. Med tanke på de betydande kostnaderna för att anskaffa nästa generations bemannade flygplan, planerar USAF att sätta in flera billigare Collaborative combat aircraft CCA:er som kan fungera tillsammans med bemannade NGAD-fighters eller autonomt.

CCA:erna som flyger med det bemannade stridsflygplanet kan ta emot och utföra kommandon från piloten. De förväntas bära avancerade sensorer, elektroniska krigföringspaket eller ytterligare ammunition för att förstärka stridsflygplanet och utföra olika roller.

Vad skulle vara en lämplig UCAV för Svenska Flygvapnet? Ska man hålla kostanden nere blir det en mindre motor och därmed mindre last så man får då fokusera på överlevnad så att man kan göra flera uppdrag samt spaning och markattack mot fasta och rörliga mål.



Ett sätt vore ett enmotorplan med liten signalsignatur, interna vapen/spaningsutrustning, motmedel och styrda bomber/robotar med kort tid över målet. Saab har tillsammans med BAE Systems tagit fram prototyper som uppfyller detta. Boeing Australia MQ-28 till vänster om MQ-25 nedan är en underljudsvariant av UCAV med liknande krav.

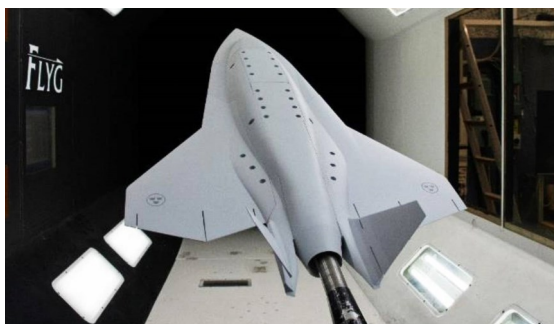
Ett förslag för dess framdrivning med en RDE motor är en enmotorinstallation med luftintag anpassat för överljudsflygningar samt med en RDE ebk som drivs av flytande väte "LH2". Lämplig motorstorlek vore Williams FJ44 klassen med ett anpassat insug som kan kyla insugsluften via LH2-kretsen då den flyger i överljudsfart, detta då dessa idag kommersiella motorer inte är designade för att tåla de inloppstemperaturer som längre tids flygning i överljudsfart medför. Detta ihop med en RDE ebk som ger ett kraftigt dragkraftstillskott till liten vikt och storlek. Man använder då all fläktluft ihop med förbränningsgaserna i RDE ebk ihop med variabelt utloppsmunstycke. Vikt och kostnad



hålls ned genom att använda lätta och billigare material ihop med kylning via LH2-vätekiten. Det räcker att ebk håller 1-10 överljudsflygningar och sedan byta ut ebk mot ny då den gjort sitt jobb och är utbränd eller skottskadad. Då dessa UCAV's oftast flyger attackuppdrag har de förväntad kort livslängd mot fiendens försvar av artilleripjäser eller pansarfordon.

Många flyg- och rymdföretag och regeringar runt om i världen arbetar aktivt med RDE-teknik. I juni avslöjade GE att man testade RDE-teknik i en turbinbaserad kombinerad cykel (TBCC) framdrivningssystemdemonstrator för högmach-applikationer som en del av insatser som stöds av DARPA, AFRL och Missile Defense Agency. GE fokuserar för närvarande på att testa övergångsläget i hög överljudshastighet från en RDE -utrustad turbin till en dubbelläges ramjet/scramjet,

Saab arbetar på ett drönarkoncept av typen "loyal wingman" i överljudsart. ([The War Zone](#)) Bilder på konceptdrönaren, som utvecklats inom ramen för Saabs program Future Combat Air System (FCAS), har nyligen cirkulerat på sociala medier. Till skillnad från många sådana konstruktioner och koncept verkar drönaren ha skräddarsytt för överljudsregim samt låg observerbarhet. Den har en elegant, blandad vinge/kroppskonfiguration med en framträdande chine "strake".



De beskurna svepta vingarna ser ut att vara utrustade med relativt mycket stora kontrollor. Flygplanskroppen verkar ha arearegeloptimering för effektivitet. Konceptet har också en enda motor, som matas transsoniskt av ett lågt observerbart bakre luftintag ovanför den främre flygkroppen. Den är avsedd att ha ett betydande inre utrymme för att bära vapen.



Boeing fortsätter att förfinas sitt koncept för nästa generations avancerade stridsflygplan F/A-XX som ska följa dagens [F-35 Lightning II](#) Joint Strike Fighter. Lagom till [Navy Leagues Sea-Air-Space Exposition](#) i Washington släppte Boeing en ny bild av hur ett operativt F/A-XX skulle se ut. Man känner igen stealth, interna vapen, obemannat, insug/framkropp strake och canard/stabilizator samt utan stjärtfena. Dock har denna skiss snabba ändringar av tvärsnittsyta "Whitcomb rule violation" så de kommer säkert att byta canard mot en stabilisator som mjukt ändrar tvärsnittsytan efter huvudvingen som kommer få annan bakkantsform.

Den har "rysk logik" med stort avstånd mellan motorerna som ger plats för ett eventuellt bakre vapenrum eller ordentligt med tankvolym samt om de får en missil i ena motorn så kan de flyga hem till hangarfartyget med en motor om de har tillräckligt girmoment utan stjärtfena. Dock kan individuellt styrda flaps/slats skapa tillräckligt girmoment.



Kelley Aerospace har officiellt lanserat världens första överljuds obemannade stridsflygfarkost (UCAV). ([DUBAI AIRSHOW 2025](#))

Drönaren, som kallas "Arrow", är designad med ett enda skal tillverkat av lätt kolfiber som gör att den kan nå hastigheter upp till Mach 2,1.

Företaget säger att det redan har fått mer än 100 förbeställningar för krigsmaskinen, som kostar mellan 9 miljoner och 16 miljoner dollar.

Arrow är utformad för att komplettera bemannade flygplan och vara en kraftmultiplikator på slagfältet i luften. Ett bemannat stridsflygplan skulle kontrollera "flera" Arrow-UAV:er och ge "var och en olika uppdrag". Detta skulle göra det möjligt att lägga till en mängd olika vapen beroende på uppdraget.

Arrow kan starta autonomt eller fjärrstyras av två markstationskontroller. Men det som gör den här maskinen så speciell är att den är den första som färdas snabbare än ljudets hastighet, som är Mach 1. Arrow kan nå Mach 2,1. Dock har de som nytt bolag stora steg att ta till ett fullt fungerande UCAV i överljud.