

Hypersoniske missiler - En ny udfordring for radarer

Peter Lysdahl Bæk, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Hypersoniske missiler og radarproblemet

Raketter bevæger sig med hastigheder, der placerer dem i det hypersoniske regime – altså mere end fem gange lydens hastighed. Et kendt fænomen ved disse hastigheder er dannelsen af et plasma omkring objektet, når det bevæger sig gennem atmosfæren. Dette plasma kan absorbere elektromagnetiske bølger, herunder radarsignaler, og derved skabe kommunikationsudfald eller vanskeligheder med at spore objektet. Problemet har været kendt og undersøgt siden 1950'erne, og interaktionen mellem radarbølger og plasma er i dag velbeskrevet i litteraturen.

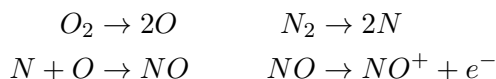
I de senere år er der imidlertid opstået en ny udfordring. Den moderne våbenindustri har udviklet såkaldte hypersoniske missiler, som – ud over at bevæge sig med ekstreme hastigheder – opererer i de lavere lag af atmosfæren i størstedelen af deres bane [1]. Disse missiler danner, ligesom tidligere raketter, et plasmalag omkring sig, men i modsætning til klassiske raketter følger de ikke en forudsigelig bane. De manøvrerer aktivt for at undgå at blive opdaget eller skudt ned.

Dette rejser et vigtigt spørgsmål: Hvis et hypersonisk missil er omgivet af et plasma, hvordan interagerer dette plasma da med radarbølger? Og i forlængelse heraf: Udgør plasmaet et problem for radarsignaturen af hypersoniske missiler?

Numeriske simuleringer af plasma og radarinteraktion

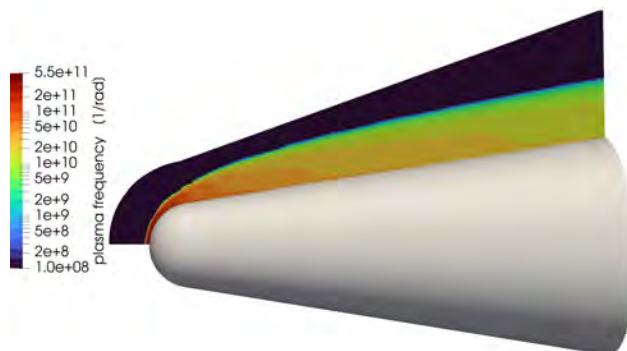
For at besvare dette spørgsmål har jeg i mit arbejde anvendt numeriske simuleringer baseret på væskedynamik ved brug af open-source programmet hy2Foam [2]. Disse simuleringer løser de klassiske Navier-Stokes-ligninger i en udvidet form – de såkaldte Navier-Stokes-Fourier-ligninger – som tillader en beskrivelse af væsker under ekstreme forhold med både kemisk og termisk ustabilitet. Under disse forhold er det nødvendigt at forlade den ideelle gasantagelse og i stedet benytte en såkaldt to-temperatur-model, hvor væsken beskrives af både en trans-rotationel og en elektro-vibrationel temperatur.

Ved at anvende denne mere avancerede termodynamiske beskrivelse kan man modellere de ekstreme forhold, der opstår omkring et hypersonisk missil, hvor temperaturer på flere tusinde grader og kemiske reaktioner som dissociation og ionisering bliver relevante. Et eksempel på sådanne reaktioner er:



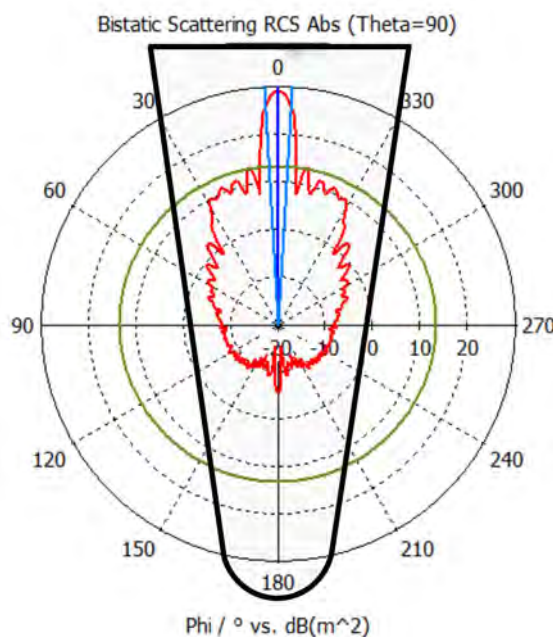
Sidstnævnte reaktion skaber frie elektroner, som sammen med ionerne udgør plasmaet omkring objektet.

Ved hjælp af disse simuleringer kan man opnå en detaljeret plasmaprofil, dvs. en fordeling af plasmaets tæthed og egenskaber omkring missilet. Denne profil kan efterfølgende anvendes i elektromagnetiske modeller, såsom Drude-modellen, der beskriver interaktionen mellem radarbølger og koldt plasma. Et eksempel på en sådan plasmaprofil ses på figur 1.



Figur 1. Plasmaprofilen for en keglestruktur som rejser gennem atmosfæren med Mach 23.6. Luften rammer fra venstre til højre.

Når plasmaprofilen er kendt, kan den anvendes som input til elektromagnetiske radarsimuleringer. Disse simuleringer beregner, hvordan radarbølger reflekteres eller dæmpes af det omgivende plasma, og hvordan dette påvirker missilets radarsignatur. I figur 2 ses et eksempel på resultatet af en sådan simulering, hvor det bistatiske radartværsnit er beregnet for forskellige vinkler. Resultaterne giver indsigt i, hvordan radarrefleksionen ændres under indflydelse af plasma og er derfor centrale i vurderingen af detektionsmulighederne.



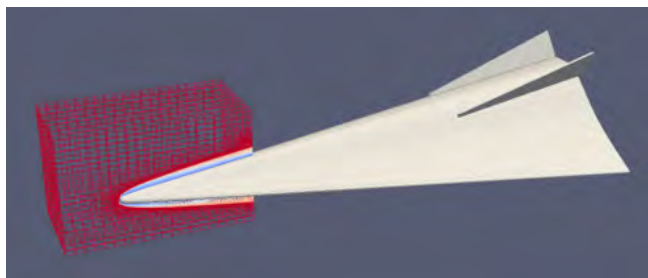
Figur 2. Resultater fra radarsignatur-simulering.

Begrænsninger ved computermodeller

Et centralt problem ved anvendelse af computermodeller til beregning af radarsignaturen i nærvær af omkringliggende plasma er, at de er ekstremt regnetunge. Udførelsen af simuleringer for et simpelt kegleeksempel, som det tidligere viste, er mulig, da objektets dimensioner er omkring $1\text{ m} \times 1.5\text{ m}$. Men når vi overfører modellen til realistiske missiler, vokser dimensionerne hurtigt til det tredobbelte eller mere. Dette medfører, at simuleringerne kræver milliarder af celler, hvilket er urealistisk at løse med den regnekraft, der er tilgængelig for kommercielle løsninger og almindelige virksomheder.

Et yderligere problem er, at selv avancerede simuleringer er meget tidskrævende. En enkelt simulering kan tage adskillige timer – og i nogle tilfælde dage – at gennemføre. Da en simulering kun dækker et begrænset tidsvindue, er det derfor ikke realistisk at udføre simuleringer for et helt missils flyvebane.

For at imødegå disse udfordringer har jeg udviklet en empirisk model, som estimerer den maksimale plasmadensitet uden behov for fulde CFD-simuleringer. Ved at benytte denne model er det muligt at identificere de sektioner af flyvebanen, hvor plasmaeffekter er væsentlige og hvor detaljerede simuleringer er nødvendige. Dermed reduceres både simuleringsomfang og beregningstid væsentligt. Ved at benytte modellen på et praktisk scenarie, som det russiske Avangard-missil i figur 3, er det muligt ved brug af denne model at bestemme hvornår simuleringer er nødvendige, samt hvor store områder er nødvendige at simulere før plasmaet bliver for tyndt til at have indflydelse på radarsignaturen.



Figur 3. Simuleringsdomæne for Avangard-missil hvor kun fronten er blevet undersøgt pga. fortyndelsen af plasmaet.

Er plasmaet et problem?

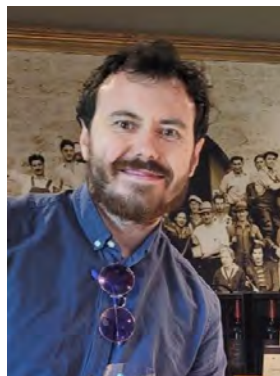
Som det er blevet beskrevet i de foregående afsnit, er der adskillige udfordringer, der skal løses, før det er muligt at udføre pålidelige simuleringer af hypersoniske missiler med tilhørende radarsignaturer. Ved at udvælge nøglepunkter på missilets flyvebane, baseret på den foreslåede model, og samtidig begrænse simuleringsdomænet, er det muligt at estimere plasmaets effekt på radarsignaturen. Dette arbejde er i gang, og det forventes, at resultaterne vil blive offentliggjort inden for den nærmeste fremtid.

Ved hjælp af moderne simuleringsværktøjer er det muligt at gennemføre disse beregninger. Dette skaber en mulighed for, at forsvaret kan udvikle og anskaffe de nødvendige radarer til at kunne detektere disse trusler i fremtidens konfliktscenarier.

Dermed kan vi vende tilbage til det oprindelige spørgsmål: Udgør plasmaet et problem for radarsignaturen af hypersoniske missiler? Det foreløbige resultat af studiet indikerer, at der forekommer en ændring i signaturen. Ændringen afhænger dog af den anvendte radars frekvens, og derfor kan der ikke gives et entydigt svar. Hvad der dog er sikkert, er, at plasmaet ikke udgør et problem langs hele flyvebanen. Den empiriske model gør det nu muligt at identificere netop de områder, hvor plasmaeffekten er signifikant, og hvor simuleringer er nødvendige. Dette reducerer kompleksiteten og gør analyser af hypersoniske missiler mere tilgængelige for industrien.

Litteratur

- [1] AVT Specialist Team AVT-ST-008 (2021) "Science & Technology Annex to Specialist Team on Hypersonic Operational Threats", TR-AVT-ST-008-A, STO TECHNICAL REPORT
- [2] V. Casseau m.fl. (2016) "A Two-Temperature Open-Source CFD Model for Hypersonic Reacting Flows, Part Two: Multi-Dimensional Analysis", *Aerospace* bind 3, nr. 4, side 45. doi.org/10.3390/aerospace3040045.



Peter Lysdahl Bæk er ph.d.-studerende ved Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet samt ved TERMA Group. Han arbejder med væskesimuleringer i OpenFOAM af hypersoniske objekter med fokus på deres radarsignatur efter skabelsen af et muligt plasmalag fra ionisering af luftmolekyler.

Nyt fra Astronomisk Selskab

Generalforsamling

Astronomisk Selskab har afholdt generalforsamling den 26. april 2025, hvor der både blev valgt nye bestyrelsesmedlemmer og ny formand. På generalforsamlingen blev Johan Fynbo valgt som ny formand, og derudover ser bestyrelsen sådan ud:

- Bertil Dorch (på valg i 2026)
- Johan Fynbo (på valg i 2026)
- Frank Missel (på valg i 2027)
- Morten Dalhoff (på valg i 2027)
- Maja Kornerup Johansen (på valg i 2028)
- Thomas Holst Sørensen (på valg i 2028)
- Førstesuppleant: Jens Hede
- Anden suppleant: Karsten Bo Rasmussen