



# Årsrapport HPM sårbarhetsanalys 2025

Sammanfattning av verksamhetsåret

MATTIAS ELFSBERG

Mattias Elfsberg

# Årsrapport HPM sårbarhetsanalys 2025

Sammanfattning av verksamhetsåret

Titel	Årsrapport HPM sårbarhetsanalys 2025 – Sammanfattning av verksamhetsåret
Title	Annual Report HPM Vulnerability Analysis 2025
Rapportnr/Report no	FOI-R--5864--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2025
Antal sidor/Pages	16
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Telekrig
FoT-område	Telekrig
Projektnr/Project no	E20951
Godkänd av/Approved by	Pernilla Magnusson
Ansvarig avdelning	Vapen, skydd och säkerhet
Exportkontroll	Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen.

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

## Sammanfattning

Denna årsrapport sammanfattar genomförd verksamhet inom projektet HPM-sårbarhetsanalys under 2025. Verksamheten har bland annat omfattat metodutveckling för pulsprovning i modväxlande kammare, metodutveckling för direktinjicering vid komponentprovning samt utveckling av metod för mätning av skärmeffektivitet.

Nyckelord: HPM, mikrovågsvapen, elektromagnetiska vapen, UAS, UAV, modväxlande kammare, MVK, sårbarhetsprovning

## Summary

This annual report summarizes the activities carried out within the project *HPM Vulnerability Analysis* during 2025. The activities have included, among other things, method development for pulse testing in mode-stirred chambers, method development for direct injection for component testing, as well as the development of a method for measuring shielding effectiveness.

Keywords: HPM, microwave weapons, electromagnetic weapons, UAS, UAV, mode-stirred reverberation chamber, susceptibility testing

## Innehållsförteckning

1	Inledning .....	7
2	Pulsprovning i modväxlande kammare .....	9
3	Direktinjicering .....	12
4	Fortsatt verksamhet.....	14
5	Referenser.....	15



# 1 Inledning

Denna årsrapport sammanfattar utförd verksamhet under 2025 inom FoT-projektet HPM<sup>1</sup>-sårbarhetsanalys, uppdrag AT.9220821, Telekrig FOI 24 inom FoT-område Telekrig. Projektets verksamhet utförs primärt på FOI Vapen Skydd och Säkerhet samt en mindre del på FOI Telekrig.

Projektet HPM-sårbarhetsanalys syftar till att öka förståelsen för hur avsiktlig elektromagnetisk påverkan med HPM-vapen påverkar elektroniska system. Detta innefattar förståelse om olika elektroniska systems sårbarhet och hur den kan rationellt provas och utvärderas. Verksamheten baseras på utveckling av metodik för HPM-provning av elektroniska system, främst i en så kallad modväxlande kammare, MVK<sup>2</sup>. HPM-vapen genererar strålning med i princip uteslutande mycket korta pulser vilket styr utvecklingen av provningsmetodik mot just pulsad provning. Projektet studerar elektroniska systems sårbarhet i allmänhet, men med visst fokus mot UAS. En relevant frågeställning som hanteras är vilka parametrar med avseende på frekvens, pulslängd och pulsrepetitions frekvens mest lämpade för bekämpning av UAS. Just UAS, inklusive patrullrobot i och med Rysslands anfallskrig mot Ukraina är högaktuella, både som hot men även som egna system där HPM är en intressant verkansform.

Projektverksamheten skapar förutsättningar för HPM-provning av elektroniska objekt med realistiska HPM-pulser, förståelse för egen skyddsförmåga, hur system påverkas och behöver skyddas men även konstruktionsunderlag som exempelvis frekvens och PRF<sup>3</sup> för egna verkanssystem mot exempelvis UAS. Projektet samverkar tätt med HPM i Vapentillämpningar, som sorterar under FoT-området Vapen och Skydd.

Verksamheten under året har främst fokuserat på vidareutveckling av provningsmetodik för pulsad provning i MVK vilket bland annat resulterat i ett konferensbidrag. Detta utgjorde en av projektets milstolpar. På grund av viss personalomsättning har resurser lagts på upplärning samt nyutveckling av mjukvara för MVK provning. Ett annat spår som pågår är metodutveckling för mätning av skärningseffektivitet i MVK, där målet är att ha möjligheten att utvärdera skärningsmaterial med icke-linjära egenskaper, exempelvis material som är RF-transparent vid lägre effekttäthet men skärmar vid högre effekttäthet. Projektet har även utformat en metod för att utföra direktinjicering av mikrovågsenergi i elektriska kretsar som lågbrusiga förstärkare vilket är relevant främst vid sårbarhetsprovning och framvägskoppling.

För att utöka frekvensområdet där provning kan utföras vid riktigt höga elektriska fältstyrkor, där begränsningen idag är S-band (2 GHz till 4 GHz), beställdes en pulsförstärkare för L-band (1 GHz till 2 GHz) under 2024 med förväntad leverans under 2025. Planen var att under 2025 integrera förstärkaren i provuppställningen samt komplettera tidigare genomförd UAS-provning i S-band. Till följd av olika omständigheter är leverans av denna förstärkare försenad till sannolikt tidigt 2026 vilket medfört att denna provning skjuts framåt.

Projektet har tidigare samverkat internationellt med tyska WTD81 och Airbus, där FOI:s åtagande slutfördes under 2024. Detta avrapporterades [1]. Samarbetet avslutades formellt tidigt under 2025. Projektet har tidigare haft ett givande samarbete med tyska Fraunhofer INT. Samarbetsavtalet har löpt ut men båda parter strävar efter en fortsättning, vilket kommer diskuteras under 2026.

---

<sup>1</sup> HPM – eng. High Power Microwave Weapon, på svenska mikrovågsvapen.

<sup>2</sup> ModVäxlande Kammare - en resonant övermodad elektromagnetisk kammare med omrörare används för att variera fältfördelningen i kammaren, vilket möjliggör effektiv provning av elektroniska objekts strålningssjimmunitet vid realistiska HPM-nivåer med relativt modesta mikrovågsförstärkare.

<sup>3</sup> PRF – Pulsrepetitionsfrekvens

### **Läsanvisning**

**Kapitel 2** beskriver årets verksamhet under delområdet pulssad provning, projektets största delområde.

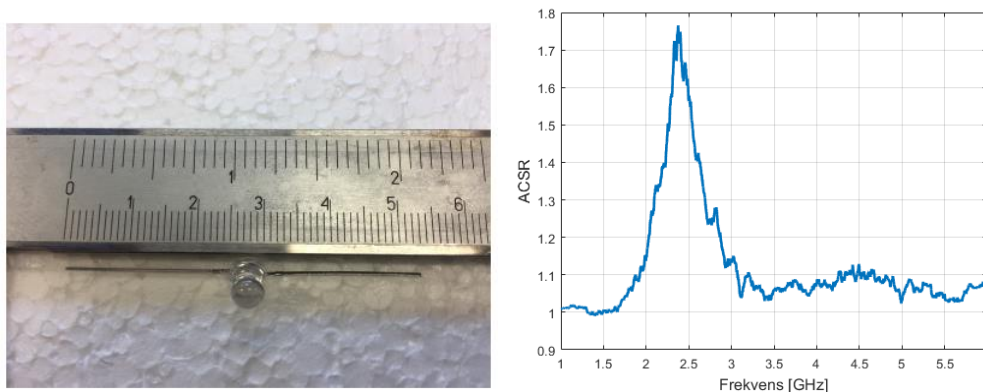
**Kapitel 3** beskriver en experimentuppställning för direktinjicering av mikrovågor i ett provobjekt som FOI arbetat med under året.

**Kapitel 4** beskriver framtida aktiviteter, både förslag på och planerade.

## 2 Pulsprovning i modväxlande kammare

Pulsprovning med korta pulser i en MVK har sina utmaningar. Detta beror på att kammaren, som är en elektromagnetisk kavitet, kräver både tid och tillräckligt lång pulslängd för att fyllas med energi och fungera som en modväxlande kammare. Under 2023 och 2024 utreddes och publicerades [2], [3] hur pulsformen, som blir en funktion av pulslängd och en given kammars tidskonstant i en MVK påverkar nivån på elektriska fältstyrkan som krävs för störande verkan. Det visade sig att även om provning utförs med en pulslängd som är godtagbar enligt vedertagna standarder som exempelvis IEC-61000-4-21 [4], så kommer erforderlig nivå för störande verkan generellt bli lägre i en liten respektive stor kammare, som ett resultat av kammarnas olika tidskonstanter. Detta är viktigt att ha i åtanke vid HPM-provning i MVK. Fraunhofer INT publicerade ett arbete [5] där pulsformens utseende studerades för olika kammare och har för avsikt studera detta fenomen vidare.

Att HPM-prova elektroniska objekt för alla tänkbara frekvenser är så klart extremt tidskrävande. Små frekvenssteg behöver tas för att säkerställa att ingen känslig frekvens missas. Provning vid olika frekvenser kan antingen rationaliseras genom att antingen bestråla vid frekvenser där det anses (eller tros) finnas hotssystem som arbetar, eller på något sätt först ta reda på om det finns frekvenser och frekvensområden där provobjektet är mottaglig för mikrovågsstrålning. Det senare har tidigare studerats inom projektet [6], där vanliga lysdioders absorption i mikrovågsområdet mättes och förstörande provning utfördes vid valda frekvenser för att jämföra absorption och nivå för förstörande verkan. Figur 1 visar ett provobjekt (lysdiod) med utvikta ben med längd ca 54 mm. Dessa förväntas fungera som dipolantennar med resonans mellan 2 och 3 GHz. Figur 1 visar även uppmätt absorption för 20 lysdioder. Lysdioderna absorberar som mest vid ca. 2,5 GHz och förväntas därmed vara enklast att förstöra med HPM vid den frekvensen, vilket utförda experiment bekräftade. Absorptionen beräknas här som ACSR<sup>4</sup> [7], som kvoten för förlusten mellan kammarens sändar- och mottagarantenn för tom kammare respektive kammare med provobjekt. Detta tidigare arbete fokuserade på förstörande verkan på ett mycket enkelt objekt.

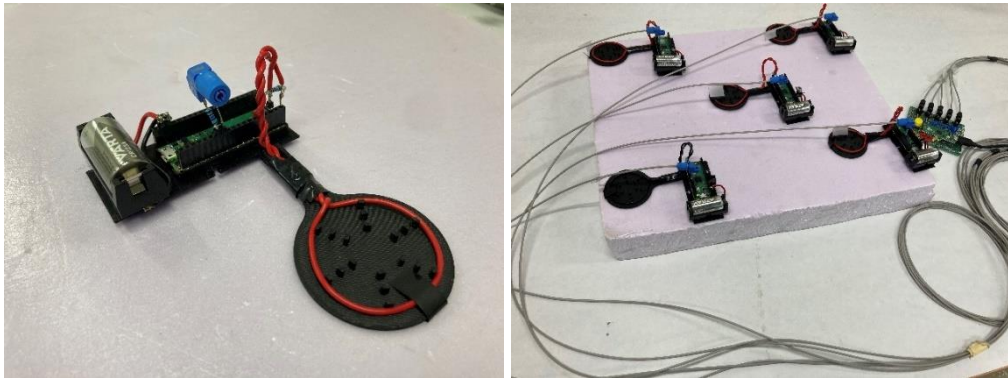


Figur 1. Lysdiod med utvikta ben samt absorption (ACSR) för 20 individer.

Under 2025 studerades och publicerades [8] inom ramen för projektet hur absorptionen kan nyttjas för att rationalisera provning för störande verkan och ett mer komplex provobjekt. För att enkelt kunna utföra störande provning i MVK togs ett provobjekt fram baserat på en mikrokontroller av modell *Raspberry Pi Pico*. Provobjektet som strömförsörjs direkt från ett batteri av typen CR123 är försedd med en loopantenn med loopradie 20 mm samt en lysdiod för anslutning till en optofiber. Loopantennen är ansluten mellan 0 V och en digital

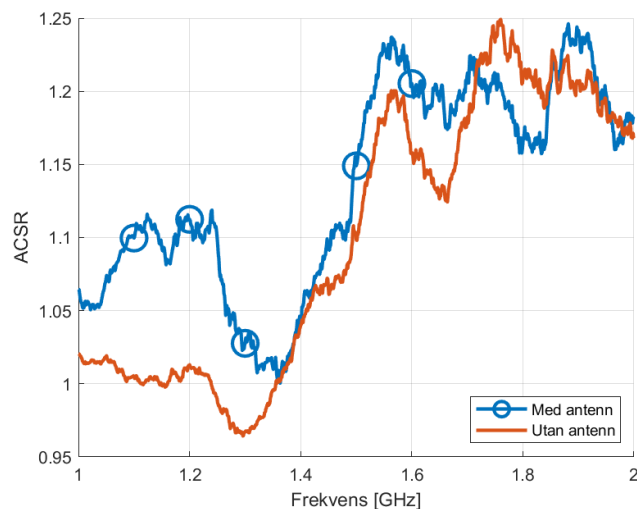
<sup>4</sup> ACSR – eng. Absorption Cross Section Ratio

ingång och är avslutad med ett motstånd på 10 kohm. Motståndet är valt för att hålla ingången normalt låg. Mjukvaran som styr provobjektet, skriven i *Python*, tillser att lysdioden normalt blinkar med 5 Hz så länge den digitala ingången som antennen är ansluten till är låg. Så fort en störning uppstår på den digitala ingången slutar dioden blinka tills provobjektet startas om. För att effektivisera provningen och erhålla mer statistiskt underlag utfördes provning med fem provobjekt samtidigt, alla ansluta med optofiber till monitoreringssystemet utanför provmiljön (MVK) som kommunicerar med MVK:ns styrmjukvara, vilken är skriven i *MatLab*. Figur 2 visar provobjektet samt fem provobjekt på en cellplastskiva ansluta med optofiber till monitoreringssystemet.



Figur 2. Provobjektet baserat på en Raspberry Pi Pico samt fem provobjekt anslutna till monitoreringssystem med optofiber.

Inför provning för störande verkan utfördes absorptionsmätningar, Figur 3, med och utan loopantennen för att visa vid vilka frekvenser den är effektiv. Loopantennen har en tydlig absorption kring 1,2 GHz. För frekvenser högre än ca 1,35 GHz är det inte antennen som står för absorptionen utan någon/några andra strukturer, såsom batteri, batterikablar, kretskortet, jordplan och så vidare. Utifrån absorptionsmätning valdes fem frekvenser ut till den störande provningen, markerade som cirklar i Figur 3.



Figur 3. Absorption för provobjekt med, blå kurva, respektive utan, röd kurva, loopantenn. Det är tydligt att loopantennen kopplar in energi omkring 1,2 GHz. Blåa cirklar indikerar frekvenser där provning genomfördes.

All störande provning utfördes med loopantennen monterad och pulslängden valdes till 4  $\mu$ s med pulsrepetitionsfrekvens 1 kHz. Provnigen utfördes i enlighet med standard

IEC 61000-4-21 [4]. MVK:ns inställda elektriska fältstyrka ökades från en nivå där inget objekt störts till alla störts i små steg tills alla fem provobjekt påverkats för att få ett bra statistiskt underlag. Tabell 1 sammanställer resultatet från den störande provningen.

Elektisk fältstyrka för störande verkan vid 1,1 GHz respektive 1,2 GHz var i medel 55 V/m respektive 56 V/m, i princip samma nivå vilket är förväntat då absorptionen är i stort sett lika. För störande verkan vid 1,3 GHz behövdes en elektisk medelfältstyrka på 111 V/m vilket överensstämmer väl med att absorptionen är lägre. För de två högre frekvenserna 1,5 GHz och 1,6 GHz var nivån som krävdes för störande verkan betydligt högre, 571 V/m respektive 524 V/m. En orsak till detta kan vara att mikro vågsenergin vid dessa frekvenser inte kopplar in i loopantennen. Istället kopplas energin till andra strukturer i provobjektet, vilka har sämre koppling till den digitala ingång som används för detektion. Alternativt kopplar energin in i loopantennen som då har betydligt lägre effektivitet vid dessa frekvenser.

Tabell 1. Absorption (ACSR<sup>5</sup>) respektive medel elektisk fältstyrka för störande verkan för provfrekvenserna.

Frekvens	ACSR	E-fält verkan
1,1 GHz	1,10	<b>55 V/m</b>
1,2 GHz	1,12	<b>56 V/m</b>
1,3 GHz	1,03	<b>111 V/m</b>
1,5 GHz	1,15	<b>571 V/m</b>
1,6 GHz	1,21	<b>524 V/m</b>

Experimenten visar att en absorptionsmätning kan användas för att rationalisera sårbarhetsprovning för störande verkan. Detta beror på att det blir möjligt att testa vid färre frekvenser för att sedan utnyttja absorptionsmätningen för att estimerar nivå för verkan vid närliggande frekvenser. Det är dock viktigt att förstå mikro vågsenergin kan koppla in i olika delar och delsystem som har olika känslighet för störning.

---

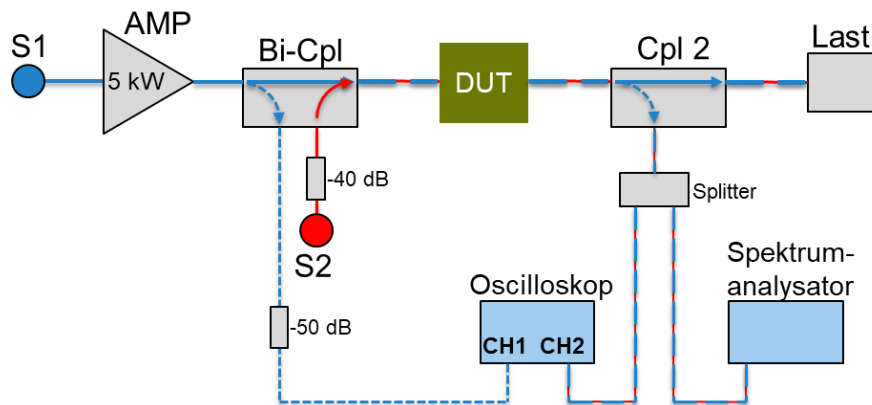
<sup>5</sup> ACSR (eng. Absorption Cross Section Ratio)

### 3 Direktinjicering

Direktinjicering av mikro vågsenergi i passiva och aktiva system och komponenter är en metod för att ta reda på komponenternas tålighet. Primärt fokus för tidigare verksamhet på FOI har varit förstörande provning av främst LNA:er<sup>6</sup> [9], [10] med antingen enstaka pulser eller pulståg. Det finns ett par vetenskapliga publikationer tillgå, men även där sker provning oftast tills komponenterna förstörs permanent [11].

Den experimentuppställning som togs fram för detta projekt bygger på en dubbel matning. Dels en lågnivåsignal (nyttosignal) men även kraftiga mikro vågpulser. Detta möjliggör att utöver detektion av förstörande verkan även observera hur komponenternas prestanda påverkas vid effektnivåer än de som orsakar permanent förstörelse. Komponenterna kommer med viss sannolikhet få sämre prestanda, exempelvis med avseende på SNR<sup>7</sup>, men även felfunkera eller degraderas vid lägre nivåer än den som krävs för direkt förstörande.

Figur 4 visar en förenklad schematisk bild över experimentuppställningen, där de kraftiga mikro vågpulserna genereras av en 5 kW pulsförstärkare (AMP) som matas av signalgenerator (S1). Nyttosignalen genereras av signalgenerator (S2) och som dämpas ytterligare med 40 dB, innan den blandas med mikro vågpulserna genom en bi-direktionell riktkopplare (Bi-Cpl) för att sedan anslutas till ingången på komponenten som skall provas (DUT). Komponentens utgång ansluts till en last för korrekt matchning, samt, via en riktkopplare (Cpl2) och en splitter till ett oscilloskop och en spektrumanalysator. Till oscilloskopet ansluts en dämpad version av mikro vågpulsen. Mätinstrumenten används för att bedöma den provade komponentens prestanda vid normal drift samt efter den blivit utsatt för kraftiga mikro vågpulser.



Figur 4. Experimentuppställning för direktinjicering med en 5 kW pulsförstärkare som pulskälla och en signalgenerator (Signal gen 2) som genererar nyttosignalen cw<sup>8</sup>.

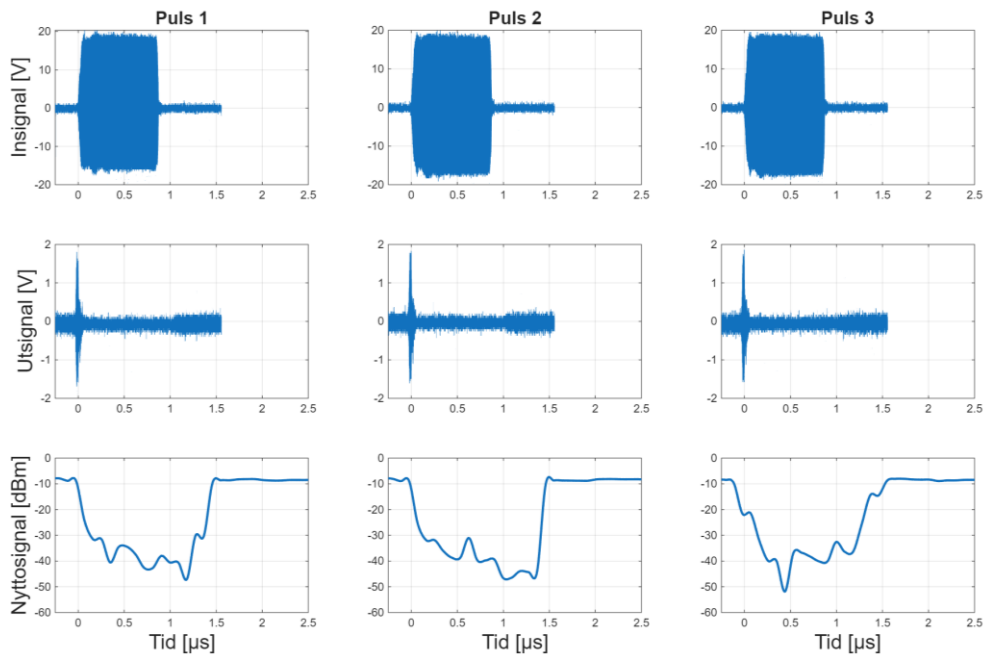
En inledande provomgång med några olika typer av LNA:er baserade på olika teknologier genomfördes. Metoden fungerade som avsett och det var möjligt att identifiera skillnader i felfunktion för olika typer av komponenter. Figur 5 och Figur 6 visar preliminära mätdata från komponentprovning av en LNA, med lägre respektive högre pulseffekt och med samma nyttosignal. Frekvensen för pulsen respektive nyttosignalen var inte den samma, vilket gör det möjligt att enbart studera hur nyttosignalen ter sig på LNA:ns utgång, genom att specifikt fokusera på nyttosignalens frekvens med spektrumanalysatorn. Nyttosignalen har normalt

<sup>6</sup> LNA (eng. Low Noise Amplifier) lågbrusig småsignalförstärkare för RF, som används till exempel för kommunikationsutrustning och GNSS.

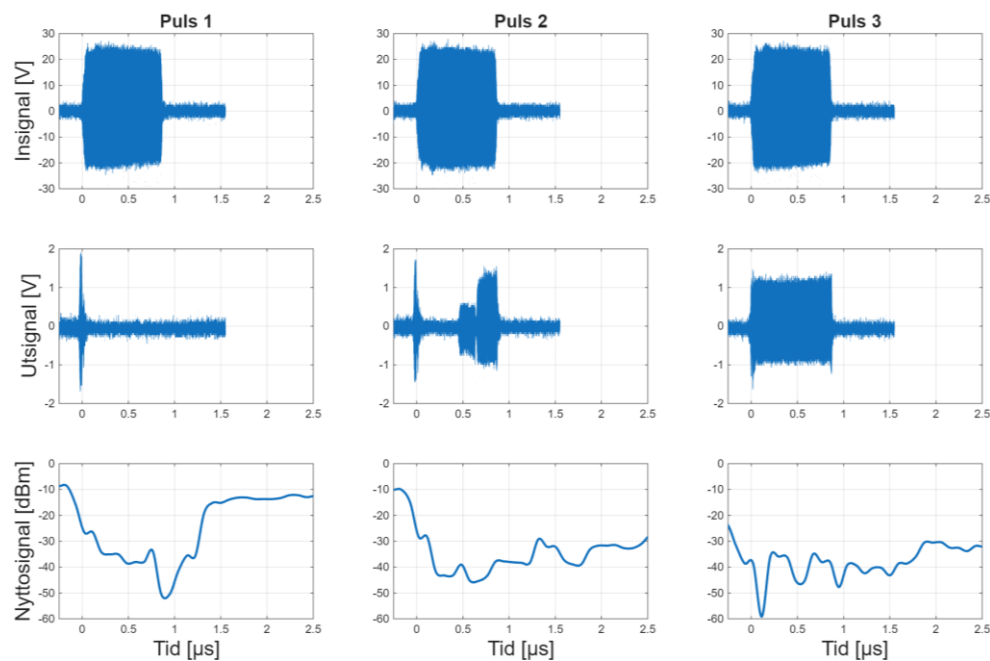
<sup>7</sup> SNR (eng. Signal to Noise Ratio) förhållande mellan nyttosignalens och brusets effektnivå.

<sup>8</sup> cw (eng. continuous wave), elektromagnetisk signal med konstant amplitud och frekvens, ej pulsad eller modulerad på annat sätt.

en amplitud på cirka -10 dBm. Pulsen före och efter LNA:n mättes med ett oscilloskop. Komponenter klarar den lägre effekten, Figur 5, men degraderas och fallerar under de tre pulserna med högre effekt, Figur 6.



Figur 5. Mätdata som visar att komponenten klarat tre högnivåpulser, där varje puls är 0,8 mikrosekunder lång. Signalerna *Insignal [V]* och *utsignal [V]* är rådata från oscilloskopen och visar mikrovågspulsen före respektive efter LNA:n, medan *Nyttosignal [dBm]* visar nyttsignalens amplitud under pulsen. LNA:n utsätts för tre högnivåpulser med en given frekvens samtidigt som nyttsignalen (cw) med en annan frekvens läggs på LNA:ns ingången. Under pulsens gång försvinner princip nyttsignalen och en del av pulsen släpps igenom LNA:n. Kort efter pulsen upphört återkommer nyttsignalen och LNA:n fungerar normalt igen.



Figur 6. Mätdata visar att komponenten degraderas och fallerar under pulsningen. Nyttosignalen återkommer endast efter första pulsen, därefter bedöms komponenten fallerat.

## 4 Fortsatt verksamhet

Verksamheten år 2026, år tre i projektcykeln, kommer i huvudsak fokuseras på utvärdering av hittills utvecklad provningsmetodik för pulsprovning i modväxlande kammare genom att utföra provning på olika elektroniska system, till exempel UAS. Beställd pulsförstärkare i L-band kommer sannolikt levereras vilket utökar frekvensområdet HPM-provning kan genomföras i, från 1 GHz till 4 GHz.

Vidare kommer metod för mätning av skärmningseffektivitet för höga pulseffekter i modväxlande kammare arbetas vidare med. Utöver huvudsyftet att kunna utvärdera icke-linjära skärmningsmaterial vid höga effekttätheter finns det andra intressanta frågeställningar, exempelvis hur väl frekvensomröring istället för mekanisk omrörning fungerar för detta ändamål.

Vid simulering av modväxlande kammare uppstår problem då man jämför en simulerad kammare med en faktisk kammare avseende Q-värdet och förluster. För att simuleringarna ska bli jämförbara med en riktig kammare behöver konduktiviteten på kammarens väggar sänkas kraftigt. Orsaken till detta kommer studeras under 2026.

Metoden för direktinjicering för komponentprovning kommer utvärderas vidare genom mer provning med olika typer av lågnivåförstärkare.

## 5 Referenser

- [1] A. Aliyali, M. Elfsberg, F. Nyberg och P. Vallejos Olivares, "Årsrapport HPM sårbarhetsanalys 2024 - Sammanställning av verksamhetsåret," FOI-R--5707--SE, 2024.
- [2] A. Aliyali, M. Elfsberg, T. Hurtig, F. Nyberg och P. Vallejos Olivares, "Short pulse testing of a reference test setup in a reverberation chamber of two different time constants," i *International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, Krakow, 2023.
- [3] A. Aliyali, M. Elfsberg, T. Hurtig, F. Nyberg och P. Vallejos Olivares, "Exploring the Effects of Time Constants on Short Pulse Testing in Electromagnetic Reverberation Chambers," i *International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, Bruges, 2024.
- [4] IEC, "IEC 61000-4-21 Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-21: Testing and Measurement Techniques - Reverberation Chamber Test Methods," IEC, 2011.
- [5] M. Suhrke, M. Lanzrath, B. Jörres och C. Adami, "Exploring Short Pulses in Reverberation Chambers," i *International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, Paris, 2025.
- [6] N. Wellander, M. Elfsberg, H. Sundberg och T. Hurtig, "Destructive Testing of Electronic Components Based on Absorption Cross Section RC Measurements," i *2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, Barcelona, 2019.
- [7] N. Wellander, M. Elfsberg och T. Hurtig, "Finding frequencies of enhanced electromagnetic coupling to electronic devices by the use of mode stirred reverberation chambers," i *International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, Angers, 2017.
- [8] A. Aliyali, M. Elfsberg och R. Fridsén-Skogsberg, "Non-destructive Testing of Generic EUT Based on Measured Absorption Cross Section Ratio," i *International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, Paris, 2025.
- [9] R. Jonsson och M. Höijer, "Pulse length dependency of the failure of a low noise amplifier," FOI-R--2285--SE, 2007.
- [10] Q.-U. Wahab, R. Jonsson, M. Höijer och L.-G. Huss, "Failure of low noise amplifier stressed by multiple microwave pulses," FOI-R--3146--SE, 2010.
- [11] A. Anzellotti, R. Kooij och A. Zwamborn, "Immunity of LNAs to bursts of RF pulses," Austin, Texas, USA, 2024.





FOI  
Totalförsvarets forskningsinstitut  
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00  
Fax: 08-55 50 31 00

[www.foi.se](http://www.foi.se)