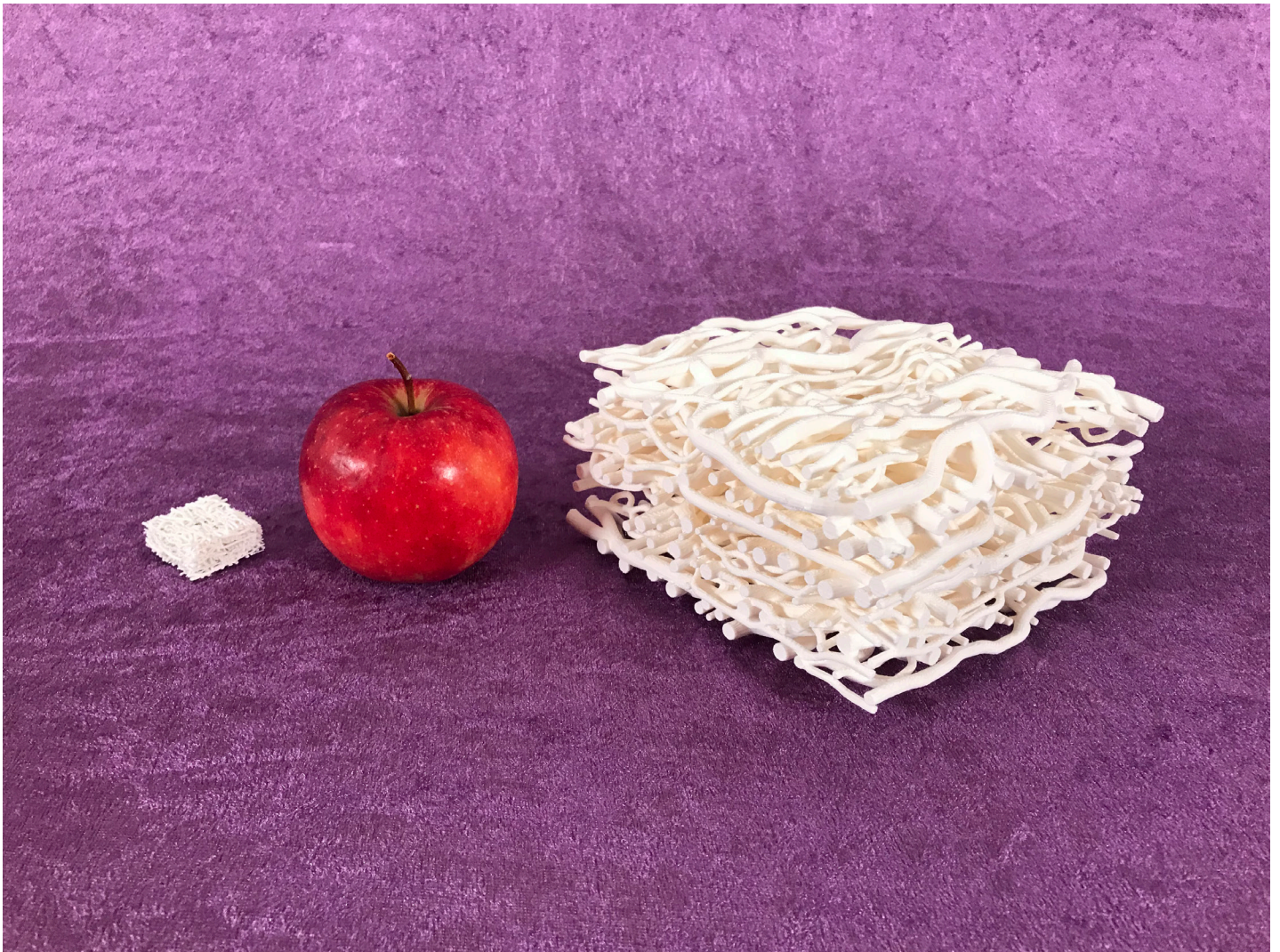


LINDA H. KARLSSON (RED.), ÅSA ANDERSSON, TOMAS HALLBERG,  
HANS KARIIS, ANNA POHL, STEVEN SAVAGE, CHRISTINA ÅKERLIND



Linda H. Karlsson (red.), Åsa Andersson, Tomas Hallberg, Hans Kariis, Anna Pohl, Steven Savage, Christina Åkerlind

## Signaturmaterial 2017–19

Slutrapport

Titel	Signaturmaterial 2017–19
Title	Materials for signature management 2017–19
Rapportnr/Report no	FOI-R--4852--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2019
Antal sidor/Pages	36
ISSN	1650–1942
Kund/Customer	FMV
Forskningsområde	Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassningsteknik
Projektnr/Project no	E72762
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem

Bild/Cover: FOI/Linda H. Karlsson och Christina Åkerlind

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

I den förändrade omvärlden har risken att möta en motståndare med en avancerad sensorteknologi ökat, vilket också ökar behovet av signaturanpassning. Inom signaturanpassning är materialen som kamouflage eller ytor består av mycket viktiga komponenter, eftersom materialens egenskaper påverkar hur väl ytorna kan detekteras av sensorer. Utvecklingen av nya sensorer, bland annat till nya våglängdsband, sker snabbt och därför behöver signaturmaterialutvecklingen hålla jämna steg. Inom projektet Signaturmaterial har FOI under 2017–2019 undersökt hur den civila utvecklingen inom materialteknik kan komma till nytta för Försvarsmakten genom förbättrad kunskap om signaturanpassning. Signaturanpassning inom visuella, infraröda och radarvåglängder har studerats. Materialutvecklingen går fort och om de civila trenderna kan fångas upp och omsättas till teknologier användbara för militära system finns en potential för en stor militär nytta. Kunskap om signaturanpassning är också viktig för värdering och utveckling av egna sensorer då vi ser att även andra länder prioriterar kamouflageutveckling.

Nyckelord:

Signaturanpassning, kamouflage, signaturmaterial, radarabsorberande material, adaptiva kamouflage, civila trender, dual-use, materialteknik, biomimetik, polarisation, superhydrofobisk, optiska antenner, IR-emitterande material, slutrapport, militär nytta, mätteknik

## Summary

In a rapidly changing geopolitical environment, the risk of encountering an opponent with advanced sensor technology has increased, and with it the need for signature management. In signature management camouflage materials or surfaces used determine how well they can be detected by sensors. It is therefore important to develop new materials to respond to the development of sensors. Within the project Materials for Signature Management during 2017–2019, FOI has investigated how the civilian development in material science can be useful for the Swedish Armed Forces by improved knowledge of signature management. Signature management in the visual, infrared and radar bands has been studied. Material technologies are developing rapidly and if civilian trends can be utilized in military system technologies, there is a potential for a large military benefit. Knowledge of signature management is also important for the evaluation and development of sensors, especially since we see that other countries are prioritizing development of camouflage technologies.

### Keywords:

Signature management, camouflage, signature material, radar absorbing materials, adaptive camouflage, civilian trends, material technology, biomimetic, polarization, superhydrophobic, optical antennas, IR emitting materials, final report, military utility, dual-use, measuring techniques

## Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning .....</b>	<b>7</b>
1.1	Frågeställningar .....	7
<b>2</b>	<b>Internationell samverkan.....</b>	<b>10</b>
2.1	Besökta arrangemang .....	11
2.2	Författade rapporter .....	11
<b>3</b>	<b>Optisk materialkaraktärisering .....</b>	<b>13</b>
3.1	Polarimetriska signaturregenskaper .....	13
3.2	<i>Round robin</i> -mätningar av BRDF och spektral reflektans .....	15
<b>4</b>	<b>Optiska antenner .....</b>	<b>18</b>
4.1	Introduktion .....	18
4.2	Hur minskar man den termiska signaturen?.....	18
4.3	Förslag till lösning – optiska antenner .....	18
4.4	Fortsatt arbete.....	19
<b>5</b>	<b>Spektral design och biomimetik.....</b>	<b>20</b>
5.1	Diffust spridande ytor .....	21
5.2	Naturliga och biomimetiska material .....	21
5.3	Uppskalning och 3D-printning.....	22
<b>6</b>	<b>Radarabsorberande material .....</b>	<b>24</b>
6.1	Inverkan av sömmar på radarkamouflage.....	24
6.2	Nya material inom radarområdet .....	25
<b>7</b>	<b>Den militära nyttan.....</b>	<b>26</b>
<b>8</b>	<b>Smutsavstötande ytor .....</b>	<b>28</b>
8.1	Tekniska lösningar .....	29
<b>9</b>	<b>FoU-trender med relevans för signaturanpassningsteknik.....</b>	<b>30</b>
9.1	Textilier .....	31
9.2	Tvådimensionella material .....	32
9.3	Adaptivt kamouflage .....	33
9.4	Möjliga synergier mellan civil FoU och militära behov .....	35
<b>10</b>	<b>Slutsatser .....</b>	<b>36</b>



# 1 Inledning

Signaturanpassningsteknik är en viktig del i skyddskonceptet för alla typer av plattformar mot en tekniskt kvalificerad motståndare med tillgång till avancerade sensorer. Generellt sett är syftet med signaturanpassning att reducera detektionssannolikheten för militära plattformar mot olika typer av sensorhot såsom radar, infraröda, visuella och akustiska detektionssystem. Beroende på förväntade hotsensorer, består signaturanpassningsåtgärderna av en kombination av olika teknologier, alltifrån formgivning till specifika material och strukturer.

Under 1950–1980-talen var Sverige en framstående aktör med tillverkning och utveckling av signaturanpassningsmateriel för många plattformar. Visby, Gripen, CV90 och maske-ringsnät är exempel på system som utvecklades med signaturfrågor i åtanke. Under en tid när tänkta motståndare hade tämligen enkla sensorer (i huvudsak ögon) prioriterades signaturmaterialforskningen ned till bevakningsnivå, men ansträngningar gjordes för att ändå behålla kompetens inom området. Med den förändrade hotbild vi nu ser prioriteras området åter upp, inte minst internationellt.

Genom att fånga upp internationella utvecklingstrender kan kunskap byggas för att bättre förstå signaturanpassning, för såväl synligt ljus som för infraröd strålning och radar. Materialegenskaper behöver värderas för att förstå hur låg signatur som är möjlig att åstadkomma med olika materialkombinationer. Den kunskapen är betydelsefull både för värdering av sensorer och vid upphandling av signaturanpassad materiel. Material för flexibel signaturanpassning kan ge våra förband bättre skydd och ökad rörlighet. Kunskap behövs för att ha en adekvat signaturanpassning vid varierande klimat, hotbilder och bakgrunder samt för att ha möjlighet att förändra sin signatur när uppdragets art förändras. Utvecklingen på hotsensorsidan är snabb.

Utvecklingen inom materialteknik är snabb och många tekniker som utvecklas för civila ändamål har potential för att utnyttjas militärt, exempelvis energibesparande beläggningar som kan användas i adaptivt kamouflage.

Detta arbete har gjorts inom Försvarmaktens samlingsbeställning för forskning och teknikutveckling inom Sensorer och signaturanpassning (FoT SoS, AT.9220419).

## 1.1 Frågeställningar

Projektet har av Försvarmakten fått i uppdrag att arbeta med ett antal övergripande frågor.

- Hur kan utvecklingen inom adaptiv signaturmateriel användas för att förbättra signaturanpassning i olika insatsmiljöer?
- Vilka åtgärder kan vidtas för att motverka nya sensorteknologier?
- Vilka värderingsmetoder kan användas för att värdera militära nyttan av nya material?

Dessa frågor har studerats i ett antal olika nationella och internationella samarbeten och studier som beskrivs nedan. Både teoretiska studier, t.ex. omvärldsbevakning, och experimentella studier av materialegenskaper som är viktiga för nya sensorer har genomförts. Sammanfattningar av de olika studierna och deras resultat beskrivs nedan.

### 1.1.1 Hur kan utvecklingen inom adaptiv signaturmateriel användas för att förbättra signaturanpassningen i olika insatsmiljöer?

Projektet har samverkat med EU-projektet *Adaptive camouflage for the soldier II* (ACAMSII) och har bland annat skrivit en rapport om adaptiva teknologier och deras potential för soldatbruk. Rapporten beskriver hur utvecklingen av adaptiva teknologier inom synligt ljus och termiskt infraröd strålning (IR) drivs av den civila marknaden, exempelvis bärbar teknik (eng. *wearable technologies*), och hur detta kan anpassas för militärt bruk.



EU-projektet beskrivs mer i kapitel 2 och rapporten i kapitel 9. Där beskrivs även fler trender från civil materialforskning, exempelvis utvecklingen av grafen och liknande material. Grafen har visats användbart i flera olika våglängdsområden, bl.a. mellaninfraröda våglängder (MWIR), långvågsmid infraröda våglängder (LWIR) och radar. Flera material med liknande egenskaper håller på att utvecklas. Andra starka trender inom den civila utvecklingen är små, böjbara ljuskällor (eng. *light emitting diodes*, LED) som kan emittera alla synliga våglängder och som kan sys på exempelvis kläder.

Projektet har även deltagit i beredningen av det kommande samarbetsprojektet *Advanced Low Observable Coatings And Structures* (ALOCAS), som beskrivs i kapitel 2 och avsnitt 6.2. ALOCAS syftar till att öka kunskapen kring nya material för signaturanpassning.

Projektet har även med i Natos SCI-panel (eng. *Systems, concepts and, integration*) SCI-287 *Assessment methods and evaluation of camouflage in an operational context*. Detta beskrivs mer i kapitel 2.

Konferenser, workshops och seminarier som projektdeltagare medverkat i samt författade rapporter återfinns i kapitel 2.

### 1.1.2 Vilka åtgärder kan vidtas för att motverka nya sensorteknologier?

Projektet har studerat åtgärder för ett antal olika nya sensorteknologier som anses kunna utgöra hot inom en snar framtid. Exempel är polarimetriska sensorer, sensorer för kortvågsmid infraröd strålning (SWIR), MWIR och LWIR. Även åtgärder för att skydda markmål mot radarhot har studerats.

Polarimetriska sensorer kan se skillnad på skapade och naturliga objekt. I kapitel 3 beskrivs hur olika materials polarimetriska egenskaper har studerats i våglängdsområden mellan ultraviolett (UV) och LWIR för att kunna motverka dessa sensorers förmåga att urskilja målet ur en bakgrund. Materialen bör vara matta och reflektera eller emittera ljus diffust. De bör också vara så ljusa som möjligt och vara högemissiva inom MWIR- och LWIR-området. I kapitel 3 har även de polarimetriska egenskaperna studerats inom SWIR, där ytor bör vara högreflekterande för att motverka detektion.

Även inom MWIR- och LWIR-området ökar tillgängligheten till och känsligheten hos tillgängliga sensorer. En åtgärd som studerats är IR-emitterande dipoler, s.k. optiska antenner, som beskrivs i kapitel 4. Dessa är mikrometerstora stavar som kan manipulera ljus. I detta projekt har de studerats teoretiskt, där det konstaterats att om stavarna är 2,25  $\mu\text{m}$  långa och har en radie på 18 nm kan de styra termisk IR.

De spektrala egenskaperna i det visuella området (VIS) hos olika material har studerats, se kapitel 5, bland annat vita biologiska material, såsom skalbaggeskal och nanocellulosa. Den vita färgen kommer ifrån att materialen sprider ljus i många olika våglängder. Denna egenskap kan vara intressant att använda för vinterkamouflage.

För radarhot mot markmål har sömmars inverkan på SAAB Barracudas Mobile Camouflage System (MCS) undersökts, se avsnitt 6.1. Undersökningen visar att sömmens djup och bredd har betydelse.

En enkel litteraturstudie av hur smuts kan påverka ett kamouflages effektivitet har gjorts, se kapitel 8. Smuts kan antingen minska eller öka nyttan av ett kamouflage beroende på situation och behov. Både hur en yta kan hållas ren och hur smuts kan förbättra kamouflage behöver studeras vidare.

### **1.1.3 Vilka värderingsmetoder kan användas för att värdera militära nyttan av nya material?**

I en doktorsavhandling har den militära nyttan kopplad till materialegenskaper studerats i samverkan med Försvarshögskolan, se kapitel 7. Bland annat har en stegmodell som länkar samman grundläggande materiefysik, reflektioner från ytbeläggningar och hur dessa avspeglas i militär nytta på hög nivå utvecklats.

Nato-gruppen SCI-287 studerar den militära nyttan av kamouflage i ett operativt perspektiv, se kapitel 2. Bland annat har en metodik för utvärdering av kamouflage tagits fram.

## 2 Internationell samverkan

Under året har informationsutbytet mellan Sverige och utländska aktörer fortsatt. Bland annat har ett så kallat *round robin*-test genomförts där de optiska egenskaperna hos ett antal spridande ytor mätts på olika laboratorier i Europa. Alla laboratorier har använt samma prover och mätresultaten har jämförts. Resultat redovisades på konferensen *SPIE Defence & Security* i Strasbourg, Frankrike<sup>1</sup>. Försöket är utförligare beskrivet i avsnitt 3.2.

Informationsutbytesavtalet mellan Sverige och Storbritannien har förlängts i fem år t.o.m. april 2024.

Konferensen *Advances in Camouflage Science & Engineering II* har planerats tillsammans med Institute of Materials och ska hållas i London under maj 2020<sup>2</sup>. Detta ger möjlighet att inhämta kunskap om aktiviteter från övriga aktörer, såsom forskningsinstitut, militära labb, universitet och högskolor.

Sverige deltar i planering av det kommande samarbetsprojektet ALOCAS, ett samarbetsprojekt med Tyskland och Nederländerna. Projektet administreras av EDA och syftar till att höja TRL hos de beläggningar som tagits fram inom det tidigare projektet *Advanced Low Observable Materials And Structures (ALOMAS)*, samt att studera nya material och koncept för signaturanpassning. ALOMAS har pågått mellan 2016–2019 och ALOCAS förväntas genomföras under 2021–2024.

Samtal förs med övriga nordiska länder i syfte att identifiera frågeställningar av gemensamma intressen.

Inom Natos SCI-panel leder FOI gruppen *Assessment methods and evaluation of camouflage in an operational context (SCI-287)*. Gruppens arbete startade 2016 och pågår till slutet av 2019. Deltagande länder, förutom ordförandelandet Sverige, är Australien, Frankrike, Nederländerna, Rumänien, Storbritannien, Tjeckien, Tyskland, Estland och USA. I ett tidigt skede (2017) genomfördes en workshop med militärer från flera av de deltagande länderna bland deltagarna. Syftet var att enas om realistiska och militärt relevanta scenarier att användas vid utvecklingen av värderingsmetoder. I scenariobeskrivningarna ingår bland annat uppdrag, väder, ljusförhållanden, egna och motståndarens fordon inklusive sensorer och signaturanpassning. Utvalda scenarier och utvalda bakgrundsterränger kommer att läggas in i olika programvaruverktyg såsom CameoSim och VBS3 för utvärdering. Simuleringar kan genomföras med fordonen i olika maskerings- och drifttillstånd. En workshop om användning av simuleringsverktyg för värdering av nytta med kamouflage genomfördes i Brno, Tjeckien, 9 maj 2019. Slutrapporten förväntas vara klar till årsskiftet 2019–2020. Sveriges deltagande har delfinansierats av F-projektet Signaturmaterial och av FoT-SAT med 50 % vardera. Under perioden 2017–2019 har gruppen haft sju arbetsmöten och två presentationer inför Nato SCI-panelen.

Projektet Signaturmaterial har stöttat genom delfinansiering EU PADR-projektet ACAMSII, som ska studera adaptivt kamouflage för soldater. Projektet är en del i EU:s förberedande åtgärd för framtida försvarsforskningsfinansiering. ACAMSII leds av Sverige och har även deltagare från Tyskland, Nederländerna, Frankrike, Portugal och Litauen.

<sup>1</sup> T. Hallberg, D. A. Pearce, P. Raven, C. J. Baker, R. P. Moore, H. Kariis, "Round robin comparison of BRDF measurements," Proc. SPIE 11158, Target and Background Signatures V, 111580I (2019); DOI: 10.1117/12.2534675.

<sup>2</sup> <https://www.iom3.org/defence-safety-and-security-committee/event/clone-advances-camouflage-science-and-engineering>.

## 2.1 Besökta arrangemang

Som en del av projektet har flertalet internationella och nationella arrangemang såsom konferenser och seminarier besökts:

- Future Armoured Vehicles Survivability, London, Storbritannien, 2017
- Sensordag, Livgardet, Kungsängen, 2017
- Nato Land Capability Group möte, Stockholm, 2017
- LedR, regementsdag, Enköping, 2017
- EDA materials workshop, Zaragoza, Spanien, 2017
- Sweden – UK Signature Modelling & Simulation Workshop, Kista, 2017
- FMV SAT symposium, Stockholm, 2018
- Future soldier technology, London, Storbritannien, 2018
- Reisebort, FFI materials workshop, Oslo, Norge, 2018
- Workshop on Terrain Data Base, EDA, Bryssel, Belgien, 2018
- International symposium for indirect protection (ISIP), Bad Reichenhall, Tyskland, 2018,
- Nato SCI Panel business meeting, Eglin Air Force Base, USA, 2018
- SPIE-konferens Security + Defence, Warszawa, Polen, 2017, Berlin, Tyskland, 2018, Strasbourg, Frankrike, 2019
- Nato SCI Panel SCI-319 Symposium on ‘Signature Management’, Brno, Tjeckien, 2019
- Nato SCI Panel business meeting, Stockholm, 2019
- Graphene Week, Helsingfors, Finland, 2019
- Lightweight Applications with Graphene, Linköping, 2019
- SIO Grafen Strategiworkshop, Stockholm, 2019
- NATO AVT-304 Research Specialist’s Meeting on ‘Graphene Technologies and Applications for Defence’, Trondheim, Norge, 2019
- International Conference on Spectroscopic Ellipsometry (ICSE-8), Barcelona, Spanien, 2019
- MSS avdelningsdag, Skövde, 2019
- Workshop Auxetic materials, EDA, Bryssel, Belgien, 2019
- Materialteknik 2050, Kista, 2019

## 2.2 Författade rapporter

“Balancing the radar and long wavelength infrared signature properties in concept analysis of combat aircraft – A proof of concept”, Carina Marcus, Kent Andersson, Christina Åkerlind, 2017, FOI-S--5812--SE,

“Conference Materials Research Society Fall Meeting 2017”, Steven Savage, 2017, FOI MEMO 6287

“Material technologies for electromagnetic utility in military applications: A world café white paper”, Steven Savage, 2017, FOI MEMO 6056

“On the polarization of light reflected from beetle cuticle”, H. Arwin , L. Fernandez, Christina Åkerlind, S. Valyukh, A. Mendoza-Galván, R. Magnusson, J. Landin, K. Järrendahl, 2017, FOI-S--5703--SE

“Optical polarization: background and camouflage”, Christina Åkerlind, Tomas Hallberg, Johan Eriksson, Hans Kariis, David Bergström, 2017, FOI-S--5780--SE

”Redovisning av konferensbidrag inom projektet Signaturmaterial”, Hans Kariis, 2017, FOI MEMO 6119

*“Signature management – Trends, materials and concepts 2017”*, Hans Kariis, Steven Savage, 2018, FOI-R--4509--SE

*“Graphene technologies for camouflage”*, Steven Savage, 2018, FOI MEMO 6543

*”Internationella samarbeten med koppling till signaturmaterial, lägesrapportering 2018”*, Hans Kariis, Steven Savage, 2018, FOI MEMO 6548

*“Optical polarization and the dependence of angle of incidence for different surfaces: comparison between different wavelengths from UV to IR”*, Tomas Hallberg, Johan Eriksson, Stefan Björkert, Hans Kariis, 2018, FOI-S--5886--SE

*”Reisebort2018 reserapport”*, Steven Savage, 2018, FOI MEMO 6502

*”Sammanfattning av konferensbidrag: SPIE S+D 2018, Berlin”*, Tomas Hallberg, Johan Eriksson, Stefan Björkert, Hans Kariis, 2018, FOI MEMO 6538

*“Round robin comparison of BRDF measurements”*, Tomas Hallberg, Hans Kariis, Daniel A Pearce, Peter Raven, Christopher J Baker, Richard P Moore, 2019, FOI-S--6090--SE

*“Optical Studies of Near-Lambertian Surfaces for Camouflage Applications”*, Christina Åkerlind, Tomas Hallberg, Sara K Jönsson, Kenneth Järrendahl, 2019, FOI-D--0903--SE

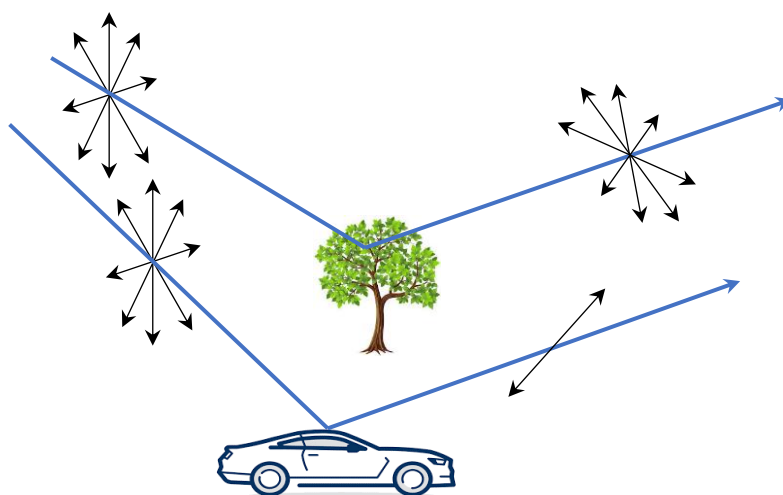
## 3 Optisk materialkaraktärisering

### 3.1 Polarimetriska signaturegenskaper

Optisk signaturanpassning är normalt anpassad efter det sensorhot som man förväntar sig inom olika våglängdsområden, såsom UV, VIS, när-IR (NIR), MWIR och LWIR. På senare tid har även sensorer inom SWIR kommit att betraktas som ett potentiellt hot att beakta för framtida kamouflage.

Ett objekt som är placerad i en omgivning framträder som synligt då kontrasten dem emellan är tillräckligt stor, vilket till stor del är baserat på olika materialytors reflektansegenskaper inom det våglängdsområde som en viss sensor är känslig. Man kan vidare utnyttja de olika kontrastförhållanden som uppkommer mellan mål och bakgrund inom olika våglängdsområden sett med en multispektral eller hyperspektral sensor, vilket ytterligare ökar möjligheten till detektion och dessutom till identifiering utifrån ett objekts spektrala karakteristik.

En annan fysikalisk egenskap hos ljuset förutom våglängden är dess polarisation, dvs. hur ljuset svänger i ett visst plan eller riktning. Linjärpolariserat ljus har en specifik riktning medan opolariserat ljus svänger i alla riktningar, se figur 1 för en illustration. Solljus är normalt opolariserat men om det faller mot en relativt jämn och slät yta polariseras ljuset som reflekteras. Ljuset polariseras olika i olika vinklar, mer i en viss reflektionsvinkel än andra. Vinkeln med maximal polarisation kallas materialets Brewstervinkel, som exempelvis för målade ytor är ca  $56^\circ$  medan den för rena metaller är över  $80^\circ$ . Solljusets reflektion i ett lackerat biltak är ljus med huvudsakligen horisontell polarisation ( $90^\circ$ ), vilket effektivt kan släckas ut med ett par polariserande solglasögon med motsatt polarisationsvinkel.

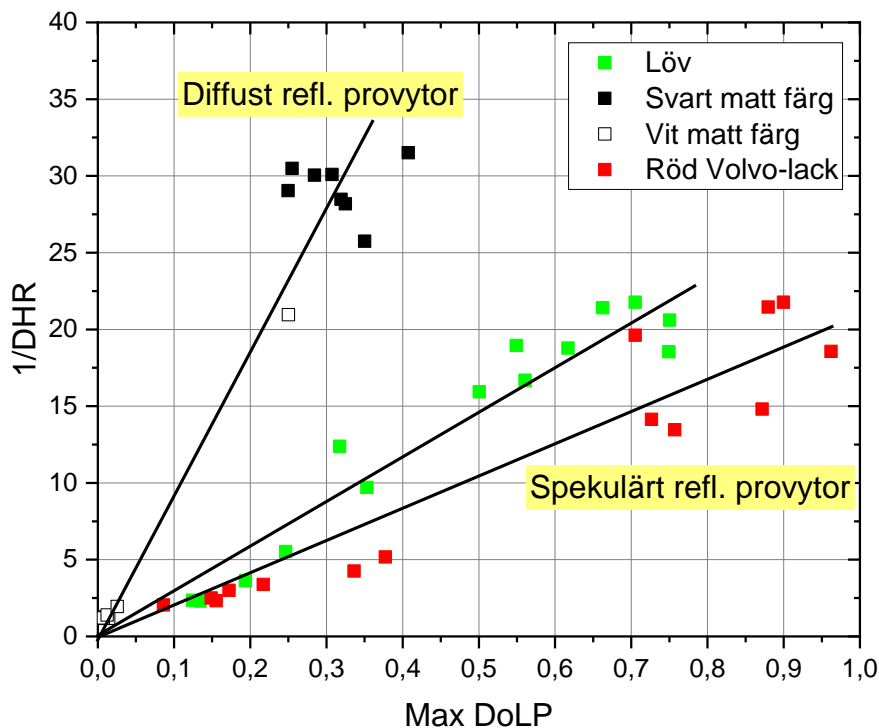


Figur 1. Ljuset polariseras mer vid reflektion mot tillverkade ytor än mot naturliga bakgrundsmaterial.

Ytors polarisationsegenskaper skapar också kontrast mellan mål och bakgrund, men på ett annorlunda sätt än vad dess spektrala reflektansegenskaper gör. Reflekterat ljus eller termisk emission från naturliga bakgrunder är i regel opolariserat medan tillverkade objekt ger upphov till polariserat ljus, vilket ger möjlighet att upptäcka objekten. Speciellt i vissa lägen ger polarisationen en tydlig kontrast där konventionella sensorer inte detekterar något och det är i dessa fall som polarimetriska sensorer med fördel skulle kunna utnyttjas.

I takt med att kommersiella robusta polarimetriska sensorer i allt större utsträckning blir tillgängliga så ökar också hotet från dessa. Därför har detta projekt tillsammans med andra

FoT-projekt inom forskningsområdet Sensorer och signaturanpassningsteknik (Signaturmodellering och Avancerade spaningssensorer) börjat undersöka polarimetriska sensorers möjligheter och hur det via signaturanpassning går att minska den polarimetriska signalen. Som ett första steg har vi polarimetriskt karakteriserat olika typer av materialytor för att undersöka vilka ytegenskaper som är avgörande för att skapa den polarimetriska signalen och hur man kan påverka den (konferensbidrag<sup>3,4,5</sup>). Ett mått på hur mycket av ljuset som är polariserat är *graden av linjär polarisation* (eng. *Degree of Linear Polarization*, DoLP), med ett värde mellan 0 och 1, där 0 är opolariserat ljus och 1 är helt och hållet polariserat. I undersökningarna kan vi konstatera att maximala värdet av DoLP (vid Brewstervinkeln) framför allt påverkas av två olika ytegenskaper, nämligen *graden av diffushet hos ytan* (eng. *Degree of Diffuse Reflectance*, DoDR), och ytans reflektans (eller emittans inom IR), där båda har ett beroende av våglängden.



Figur 2. Figur som visar ett linjärt förhållande mellan max DoLP och inversen av reflektansen (1/DHR, eng. *Directional Hemispherical Reflectance*, DHR) och dessutom att mer diffust reflekterande ytor ger upphov till lägre polarisationsgrad än mer speglade ytor.

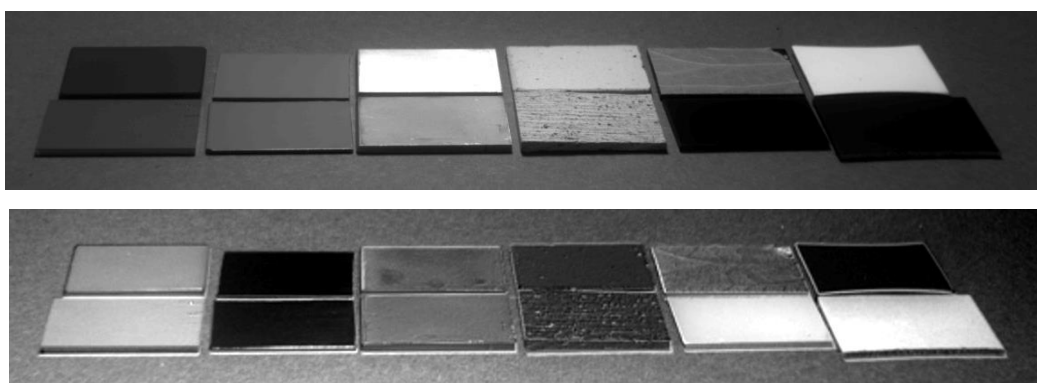
En analys av resultaten visas i diagrammet i figur 2, där några utvalda undersökta provytor visar ett tämligen linjärt samband mellan maximalt värde av max DoLP och inversen av

<sup>3</sup> C. Åkerlind, T. Hallberg, J. Eriksson, H. Kariis, D. Bergström, "Optical polarization: background and camouflage," Proc. SPIE 10432, Target and Background Signatures III, 1043204 (2017); DOI: 10.1117/12.2278767 (FOI-S--5780--SE).

<sup>4</sup> T. Hallberg, J. Eriksson, S. Björkert, H. Kariis, "Optical polarization and the dependence of angle of incidence for different surfaces: comparison between different wavelengths from UV to IR," Proc. SPIE 10794, Target and Background Signatures IV, 107940U (2018); DOI: 10.1117/12.2327022 (FOI-S--5886--SE).

<sup>5</sup> T. Hallberg, J. Eriksson, S. Björkert, H. Kariis, "Sammanfattning av konferensbidrag: SPIE S+D", Berlin, (2018); (FOI Memo 6538)

reflektansen (gäller även för emitterad strålning inom IR) inom ett brett våglängdsintervall (UV–LWIR, 275 nm – 12  $\mu$ m). Det betyder att ju mörkare en yta är desto mer polariserat är det reflekterade eller emitterade ljuset från den, medan ljuset från en vit eller högre reflekterande yta reflekterar eller emitterar ljuset mindre polariserat. Detta kan ses i figur 3 där en opolariserad (övre) och en polariserad (undre) bild av de undersökta provytorna visas. Polarisationen visar värdet på DoLP uttryckt i gråskala, där hög ljushet i bilden motsvarar högt DoLP-värde (vit, DoLP~1) och ju mörkare grånyans desto lägre DoLP (svart, DoLP~0). Bildresultaten bekräftar att ljusa ytor i allmänhet ger låga DoLP-värden medan mörka ytor ger höga värden. Dessutom visar figur 2 att ju mer diffust reflekterat eller emitterat ljuset är från en yta, desto mindre är polarisationsgraden jämfört med en mer speglande yta.



Figur 3. Överst en opolariserad bild av provytorna och underst en polariserad bild som visar polarisationsgraden (DoLP), där ett lågt DoLP-värde har mörk nyans och högt värde har ljus nyans. Man kan konstatera att ljusa ytor i allmänhet ger låga DoLP-värden medan mörka ytor ger höga värden. Bilderna är registrerade inom det visuella våglängdsområdet.

Slutsatsen är att signaturanpassning mot polarimetriska sensorer bör eftersträva matta ytor som reflekterar eller emitterar ljuset diffust och att ytorna är så ljusa som möjligt eller att ytorna är högemissiva inom IR. Kravet på att ytor ska vara så matta som möjligt motsvarar kravet på traditionell signaturanpassning medan kravet på ljushet/högemissivitet till viss del, beroende på bakgrunden, kan vara problematiskt speciellt inom visuella området och IR-området. Däremot är många ytor (exempelvis målade) och bakgrundsmaterial (exempelvis vegetation) högre reflekterande inom NIR–SWIR-området vilket ger ett lägre polarimetriskt signaturbidrag.

### 3.2 **Round robin-mätningar av BRDF och spektral reflektans**

En viktig del av materialforskning och utveckling inom signaturanpassning för elektrooptiska/IR-området är att kunna karakterisera olika ytors optiska egenskaper spektralt inom ett tillräckligt brett spektralområde som inkluderar tänkbara hotsensorers spektralkänslighet. Detta är relevant för en rad olika verksamheter, exempelvis materialutveckling, verifiering av kravspecifikationer, materialkontroll beträffande påverkan av miljöfaktorer och åldrande, för input av materialparametrar för signaturberäkningar eller validering av modelleringsresultat.

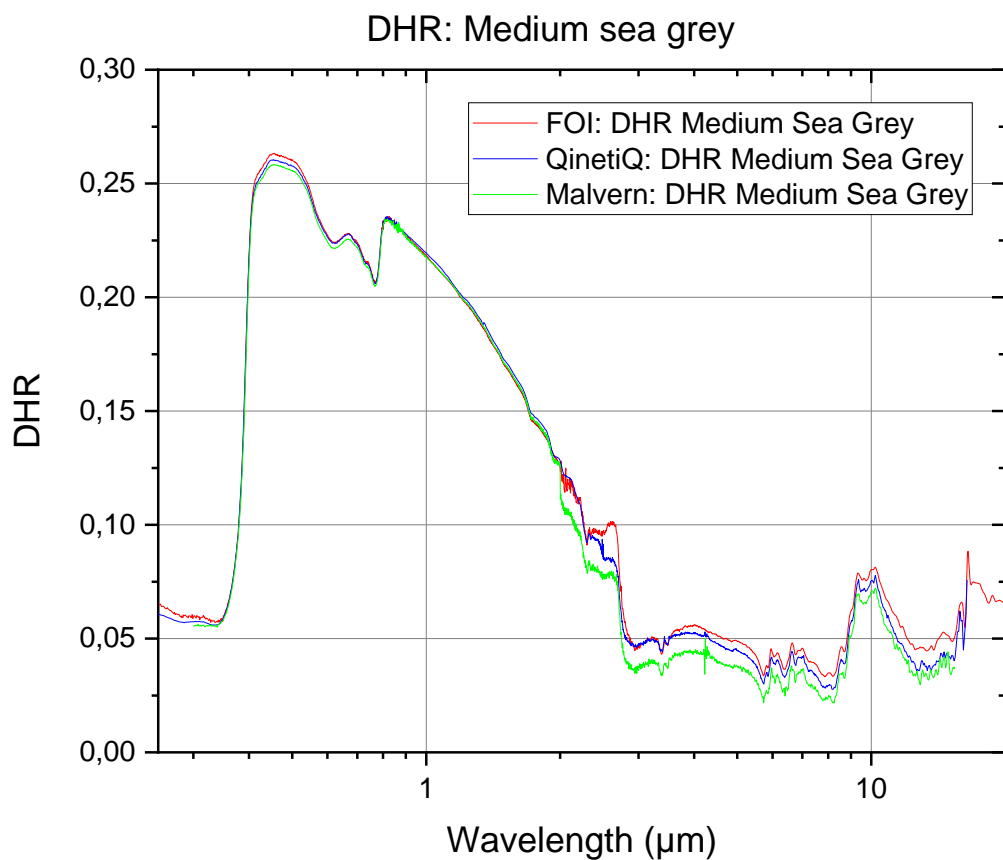
Denna mätverksamhet kräver god kännedom och kunskap kring materialfysik, mätmetodik och tillförlitligheten hos mätresultaten. Därför har vi inom ett bilateralt informationsutbyte med Storbritannien, tillsammans med QinetiQ Ltd och Malvern Optical Ltd, gjort jämförande labbmätningar av spektral reflektans med integrerande sfär (DHR) och BRDF (eng. *Bidirectional Reflectance Distribution Function*). Dessa *round robin*-mätningar genom-



fördes på tre olika provtyper: gråmålad yta, svartlackerad blank yta och metalliserad textil-yta. Olika mätförhållanden och vissa instrumentinställningar specificerades innan mätningarna påbörjades för att göra en relevant jämförelse.

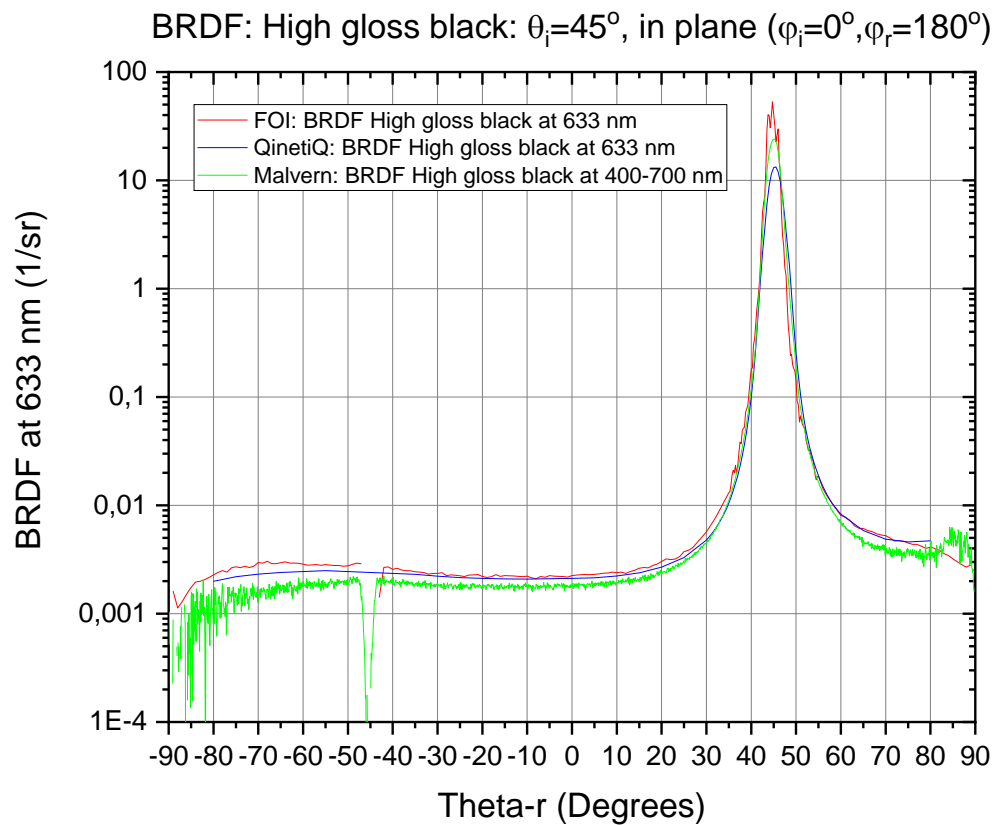
Slutsatsen av jämförelsen är att mätresultaten från de tre olika forskningsutförarna stämmer väl överens med varandra. För de spektrala reflektansmätningarna var inte skillnaden större än de enskilda instrumentens mätfel och för BRDF-mätningarna var överensstämmelsen mycket bra för diffust spritt ljus men kunde ibland skilja sig åt för starkare spekulära reflexer, vilket dock har en rimlig förklaring. Till exempel påverkar val av aperturstorlek vid detektorn resultatet för kraftigare spekulära reflexer. Exempel på mätresultat ges i figur 4 för spektral DHR och figur 5 för BRDF.

Resultaten av *round robin*-jämförelsen presenterades vid konferensen *SPIE Security + Defence*, 2019 i Strasbourg, Frankrike<sup>6</sup>.



Figur 4. Exempel på mätresultat från *round robin*-jämförelsen mellan FOI, QinetiQ och Malvern Optical. Spektral DHR för gråmålad yta.

<sup>6</sup> T. Hallberg, D. A. Pearce, P. Raven, C. J. Baker, R. P. Moore, H. Kariis, "Round robin comparison of BRDF measurements," Proc. SPIE 11158, Target and Background Signatures V, 111580I (2019); DOI: 10.1117/12.2534675 (FOI-S--6090--SE)



Figur 5. Exempel på mätresultat från *round robin*-jämförelsen mellan FOI, QinetiQ och Malvern Optical. BRDF vid 633 nm för svartmålad blank yta vid infallsvinkeln  $45^\circ$  i infallsplanet.

## 4 Optiska antenner

### 4.1 Introduktion

Optik och elektromagnetisk fältteori kommer ursprungligen från olika skolor och en del formuleringar och definitioner skiljer sig därför åt. Eftersom våglängdsområdena skiljer sig åt studeras olika fenomen i de olika områdena. När det gäller exempelvis radiovågor är dessa av storleksordningen 1 mm till 100 km. Det har därför varit lätt att tillverka objekt som interagerar med radiovågor eftersom objekten är i motsvarande storlek.

Optik behandlar våglängder på mikro- och nanometernivå. Den klassiska optiken studerar hur ljus bryts genom olika linser. För att göra det hela ännu mer förvirrande handlar begreppet mikrovågsteknik inte om vågor av storleksordningen mikrometer utan om radiovågor. Mikro används här i betydelsen ”mycket liten”.

Man har tidigare inte kunnat tillverka tillräckligt små objekt, förutom gitter, som kunnat manipulera ljus på mikrometernivå. I samband med nanoteknikens intåg har möjligheter öppnat sig för att man ska kunna tillverka objekt även på mikrometernivå. På så sätt har man kunnat utvidga begrepp som tidigare används inom elektromagnetisk fältteori till att även omfatta optik. Ett exempel på detta är IR-emitterande dipoler, så kallade optiska antenner, som beskrivs nedan.

### 4.2 Hur minskar man den termiska signaturen?

Ett vanligt problem när man konstruerar kamouflage för termisk IR (MWIR och LWIR) är att objekten man försöker dölja blir överhettade. Vi har tidigare undersökt om det går att konstruera en ytbeläggning som kombinerar egenskaperna att inte synas i en värmekamera, dvs hög reflektans i 3–5 och 8–12  $\mu\text{m}$ , med en avkylande effekt, nämligen hög emitans i 5–8  $\mu\text{m}$ . En ytbeläggning som tillverkats av Spectrogon har analyserats och konstaterats fungera bra. Detta arbete redovisas i referens<sup>7</sup>.

Eftersom den undersökta lösningen är en multilagerstruktur lämpar sig metoden bara för normalt infall, dvs om man ser objektet längs en linje längs ytans normal. Kamouflaget fungerar därmed sämre när det observeras från sneda vinklar.

### 4.3 Förslag till lösning – optiska antenner

För att undkomma detta problem studeras ett annat koncept som bygger på dipoler som fungerar som optiska antenner. Antennteorin har historiskt utvecklats vid andra våglängder än de optiska, nämligen för mikrovågor och radiovågor. Detta har gjort att de begrepp som använts för att studera antenner inte kan tillämpas rakt av för optiska våglängder då andra fenomen uppträder. Dessa fenomen har studerats, såsom plasmoner som uppträder vid optiska frekvenser. En annan skillnad är att antennerna blir så små att man måste räkna på inträngningsdjupet. Den så kallade skineffekten, som bestämmer inträngningsdjupet, gör att strömmarna i ett ledande material går på ytan och om då inträngningsdjupet är av samma storleksordning som tjockleken av själva antennen måste man även ta hänsyn till detta.

---

<sup>7</sup> A. Pohl, J. Fagerstöm, H. Kariis, R. Lindell, T. Hallberg, H. Högström, “Camouflage in thermal IR: spectral design,” Proc. SPIE 9997, Target and Background Signatures II, 99970C, (2016), DOI: 10.1117/12.2241174

Ett koncept har tagits fram bl. a. med programvaran FEKO<sup>8,9</sup> för hur man ska konstruera optiska antenner som strålar i området 5–8  $\mu\text{m}$ , dvs i det våglängdsområde där sensorer normalt inte är känsliga och där ett fordon eller person alltså inte riskerar att bli upptäckt. Tanken är att objektet ska kunna stråla ut värme i detta band och ha förmågan till avkylning utan att synas i en IR-kamera. För att uppnå önskad effekt bör antennerna ha längden 2,25  $\mu\text{m}$  och radien 18 nm.

#### 4.4 Fortsatt arbete

Till nästa projekt planeras inköp av ledande partiklar i den beräknade storleken för att blandas med ett bindningsmaterial till en färg. Slutligen planeras mätningar och utvärderingar av denna färg.

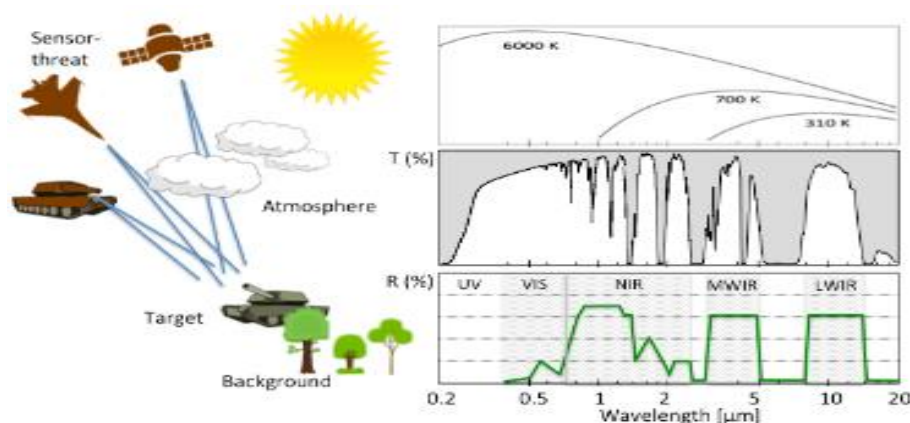
---

<sup>8</sup> Ordal *et al.*, "Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti and W in the infrared and far infrared," Applied Optics, Vol. 22, No. 7, (1983)

<sup>9</sup> <https://altairhyperworks.com/product/FEKO>

## 5 Spektral design och biomimetik

Signaturanpassning (mot bakgrunder) finns överallt i naturen. Bytesdjur använder kamouflage för att dölja sig för rovdjur och rovdjur använder sig av kamouflage för att kunna överraska sina byten. Genom mänsklighetens historia har grönska använts flitigt som kamouflage, från fikonlöv till granris, beroende på kontext och behov.



Figur 6. Exempelscenario tillsammans med transmission och reflektion genom atmosfären för de olika våglängdsområdena [1].

Syftet med kamouflage är att minska upptäcktsavståndet samt öka tiden till upptäckt. I dagens kamouflage döljs människor, fordon och andra objekt genom att kontrollera färgen och andra optiska egenskaper på deras ytor, och i möjligaste mån anpassa till bakgrundens reflektans. I takt med att mer avancerade sensorer utvecklas måste kamouflage också anpassas mot ny sensorförmåga och nya våglängdsområden. I alla våglängdsområden (VIS, NIR, SWIR, termisk IR) behövs reflektansmatchning göras, fast den ser olika ut i de olika våglängdsområdena. I bedömningen av ett sensorhot måste också hänsyn tas till solinstrålning och atmosfärens transmission, se figur 6. Genom att måla eller belägga ytorna kan de designas till att ha ett specifikt våglängdsberoende, så kallad *spektral design*. När tekniken används på ytor är syftet att skapa önskade optiska egenskaper, något som är relevant inom området signaturanpassning. Önskade egenskaper<sup>10,11</sup> ur ett kamouflageperspektiv kan vara:

- 1) rätt reflektans för att matcha bakgrunden
- 2) låg glans (diffus)
- 3) låg polarisationsgrad (depolariserande)
- 4) låg emittans
- 6) styrbar kulör
- 5) icke-metallisk för att matcha önskade radaregenskaper.

<sup>10</sup> Kent E. Andersson, Christina Åkerlind, "A review of materials for spectral design coatings in signature management applications", SPIE Proceedings 9253, Vol. 92530Y (2014).

<sup>11</sup> K. Andersson, "On the Military Utility of Spectral Design in Signature Management: A Systems Approach," Finska Försvarsuniversitetet, Serie 1: Research Publication Nr. 21 (2018).

I det nordiska klimatet vill man ibland dölja ett varmare objekt i en kallare bakgrund. Därmed vill man i det termiska infraröda området ha en lågemissiv yta, dvs en yta som har bredbandig emissivitet. Den kan då ses som "vit".

## 5.1 Diffust spridande ytor

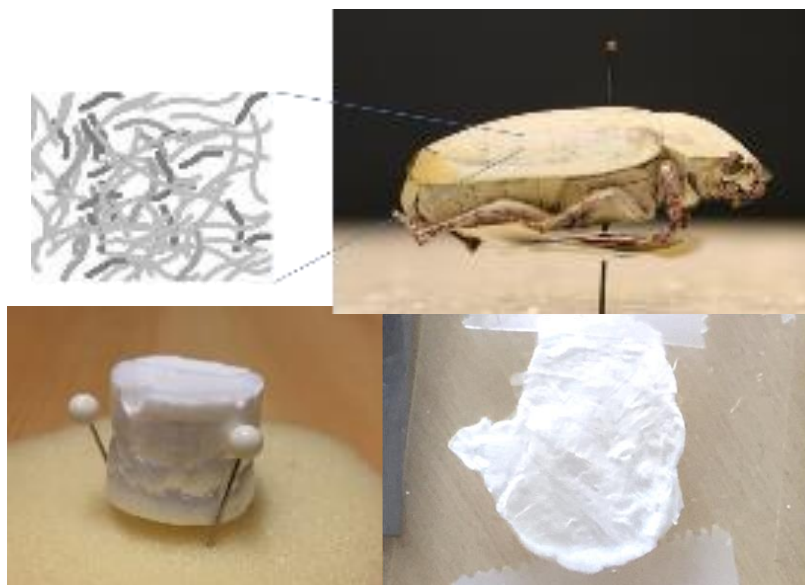
Diffust spridande ytor svarar som regel upp emot flera av de önskade och efterfrågade kamouflageegenskaperna. Anledningen är att dessa ytor sprider ljus lika mycket åt alla håll och därmed uppkommer det inte reflexer eller ljusglimtar. Är ytan dessutom vit sprider den alla våglängder lika mycket och därmed bör det bli svårare att klassificera ytan som mänskligt tillverkad.

## 5.2 Naturliga och biomimetiska material

Material som syntetiskt härmar naturens eget kamouflage kallas *biomimetiska material*. I projektet har vita naturligt förekommande material studerats som möjliga kamouflagematerial. Ett exempel är den vita skalbaggen *Cyphochilus insulanus* vars skal sprider vitt ljus exceptionellt väl trots att skalet är tunt. Skalbaggen har undersökts väl det senaste decenniet av forskare runt om i världen. Kan denna lilla insekts lätta skal, med en optimerad materiellstruktur för spridande av ljus, motsvara de egenskaper som önskas av ett snökamouflage?

Vår ansats är att den gör det förvånansvärt bra ur vissa aspekter, men då användning av skalbaggar inte är realiserbart inom militära tillämpningar behöver alternativa och artificiella kandidater undersökas. Dessutom behöver modifieringar göras ur andra aspekter. Flera tänkbara materialkandidater finns: bariumsulfat ( $\text{BaSO}_4$ ), titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ), spectralon, teflon, cellulosa (packmaterial), proteiner etc.

Eftersom hållbarhetstänkandet är väl utvecklat inom Försvarmakten och hela samhället inriktas mot förnyelsebara material, faller det sig naturligt att titta närmare också på de materialkandidater som återfinns i naturen, se figur 7. I detta projekt har följande material studerats: skalbaggen *Cyphochilus insulanus*, cellulosabaserade material samt ett protein (lysozyme från hönsägg). Under våren 2019 har studier genomförts på bland annat vita spridande puckar av cellulosa nano-fibrer (CNF) tillhandahållna av Stockholms Universitet.



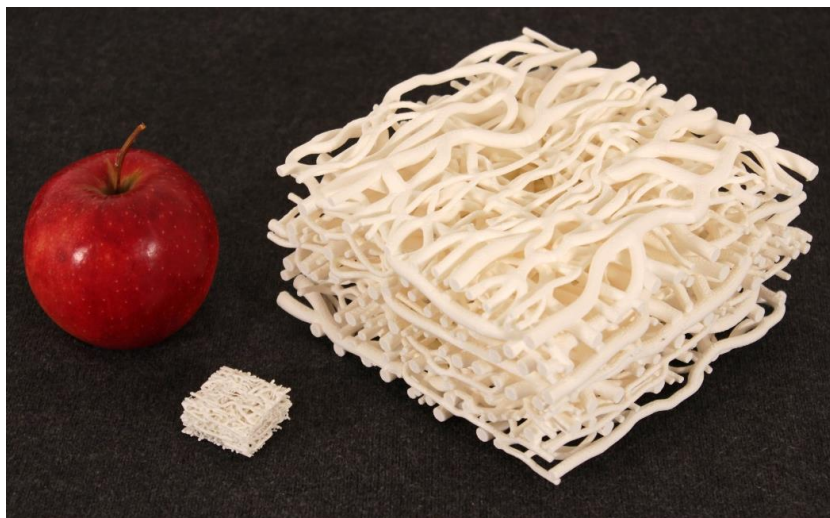
Figur 7. Exempel på "naturliga" vita material. Skalbaggen *Cyphochilus insulanus* och en skiss på dess interna spridande struktur, ett puckliknade poröst cellulosabaserat material samt en film av ett protein (lysozyme från hönsägg).

Under våren 2019 har ett examensarbete (för kandidatexamen i fysik) genomförts i samarbete mellan FOI och Linköpings Universitet där optisk polarisation och spridande egenskaper studerades hos proteinbaserade ytor<sup>12</sup>. En jämförelse mellan de tre materialen chitin (skalbaggeskal), cellulosa och protein, presenterades på en poster på konferensen ICSE-8 i Barcelona, våren 2019<sup>13</sup>. Sammanfattningsvis kan sägas reflektionsegenskaperna för de tre materialen är relativt lika i såväl det visuella som i det nära infraröda området med en relativt hög reflektans som och maximum i det visuella (~60-80%) och sedan avtar med längre våglängder. I det termiska infraröda visar sig reflektansen vara låg (10% för proteinytan) till mycket låg (5% för cellulosa pucken) medan skalbaggen hade en reflektans ~ 20% i samma område.

Att materialen har diffusa egenskaper är uppenbart, hurvida de även kan beskrivas som nära lambertska, återstår att avgöra.

### 5.3 Uppskalning och 3D-printning

Syftet med studier av den vita skalbaggens skal var ursprungligen att se om dess egenskaper kunde transformeras till längre våglängder och vara användbart inom IR-området. Med utgångspunkt i analys av tomografiska tvärsnitt av dess struktur, och jämförelser med teorin om Bragg-speglar (ett sätt att beskriva optiska filter av periodiska dielektriska material som kan uppkomma tex genom att om man sätter samman många olika lager av rätt anpassade tjocklekar) kan ett ordnat segment skapas. Det görs genom att man från den periodiskt uppbyggda strukturen plockar bort ca en tredjedel av de olika lagren på ett slumpmässigt sätt<sup>14</sup>. Baserat på svepelektronmikroskopbilder av skalbaggeskalet har en CAD-modell<sup>15</sup> av ett sådant ordnat segment skapats. I denna har såväl positioner, lager och fibrilformer tilldelats slumpmässiga egenskaper liknande fibrilerna i skalbaggeskalet.



Figur 8. 3D-utskrift av skalbaggeskal två skalor där den större ungefär motsvarar dimensioner för radarvåglängder. Ett äpple har satts in i bilden som storleksjämförelse.

<sup>12</sup> S. Jönsson, “*Optical Studies of Organic Materials based on Hen Egg White Lysozymes*”, Linköping University | Department of Physics, Chemistry and Biology, Bachelors thesis, LITH-IFM-G-EX--19/3634--SE (2019)

<sup>13</sup> C. Åkerlind, T. Hallberg, S. K. Jönsson, K. Järrendahl, “*Optical Studies of Near-Lambertian Surfaces for Camouflage Applications*”, 2019 (FOI-D-0903-SE)

<sup>14</sup> D. T. Meiers, M-C. Heep and G. von Freymann, “*Invited Article: Bragg stacks with tailored disorder create brilliant whiteness*”, APL Photonics, Vol. 3, ss: 100802 (2018)

<sup>15</sup> Tack till Per Glendor, Sensorinformatik, FOI

3D-utskrifter på nanometernivå är numera möjligt med 3D-skrivare<sup>16</sup> men tekniken finns ännu inte i Sverige. Däremot går det bra att skriva ut 3D-modeller med en storlek motsvarande radarvåglängder. Att skriva ut på en större skala motsvarande radarvåglängder bidrar till ökad förståelse för vilka problem som följer med uppskalningsprocessen inför utskrift av modell som motsvarar IR-våglängder. Därför har två modeller skrivits ut<sup>17</sup>, se figur 8, där 3D-skrivarens utskriftsförmåga med avseende på dimensioner har testats. Den stora modellen mäter 14x14x7 cm<sup>3</sup> och har en storlek som ungefär motsvarande radarvåglängder medan den minsta modellen mäter 2,8x2,8x1,4 cm<sup>3</sup>.

---

<sup>16</sup> <https://www.nanoscribe.com/en/>

<sup>17</sup> Tack till Pontus Köhler, Elektrooptiska system, FOI



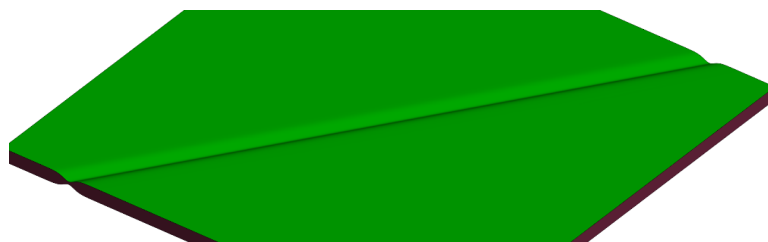
## 6 Radarabsorberande material

### 6.1 Inverkan av sömmar på radarkamouflage

FOI har på uppdrag av FMV<sup>18</sup> tagit fram en metodik för att beräkna radarsignaturen för en godtycklig plattform beklädd med kamouflage. Metodiken har tillämpats på Saab Barracudas s.k. *Mobile Camouflage System* (MCS). Metoden har validerats med mätningar på provbitar samt testats på en fullskalig stridsvagn T-72. Jämförelse med mätningar har gjorts med mycket god överensstämmelse, se referens<sup>19</sup> och referens<sup>20</sup>.

I samverkan med FoT-projektet *Signaturmaterial* genomfördes även en studie rörande sömmars inverkan på radarspridningen. Detta arbete beskrivs kortfattat nedan. Hur ett kamouflagagesystem appliceras på ett objekt, exempelvis en stridsvagn, kommer att inverka på radarspridningen. Detta gäller exempelvis om materialet är sträckt, buckligt eller böjt. Även sömmar genom kamouflaget kan påverka då dessa komprimerar materialstrukturer lokalt. Detta förändrar absorbentens elektromagnetiska egenskaper och skulle till och med kunna innebära avbrott i strukturen. Sådana förändringar av radarabsorbenten kan leda till att sömmarna verkar som elektromagnetiska spridare vilket inverkar på radarsignaturen.

Inverkan av sömmar och avbrott genom en radarabsorbent har undersökts genom att beräkna den monostatiska radarmålarean vid 10 GHz för kvadratiska plattor med sida 18 cm. Elektromagnetiska beräkningar genomfördes med momentmetoden (eng. *Method of Moments*, MoM) med programvaran FEKO<sup>21</sup>. Olika typer av sömmar och avbrott genom en materialstruktur har studerats, ett exempel visas nedan i figur 9.



Figur 9. Illustration av en dubbelsidig mjuk söm i absorbentstrukturen, vy snett uppifrån.

Kortfattat kan sägas att resultaten visar att både sömmens bredd och djup har betydelse, ju större deformationen är, desto sämre blir radarabsorbentens dämpning, vilket resulterar i

<sup>18</sup> FMV-projekt *FoT SAT 13–15* och *FoT SAT 16–18*

<sup>19</sup> M. Gustavsson, Å. Andersson, P. Glendor, R. Jonsson, M. Karlsson, N. Karlsson, "Metodutveckling för radar-målyteberäkning av objekt med mobilt maskeringssystem, MCS," FOI-RH--2008--SE, (2018)

<sup>20</sup> N. Karlsson, Å. Andersson, L. Bohman, P. Glendor, O. Gustafsson, M. Gustavsson, R. Jonsson, H. Kariis, M. Karlsson, S. Savage, N. Wadströmer, E. Zdansky, C. Åkerlind, "Slutrapport *FOT-SAT 16–18*", FOI-R--4637--SE (2018)

<sup>21</sup> FEKO EM Simulation Software, Altair Engineering, Inc. 2018. [Software] Tillgänglig: <https://altairhyperworks.com/product/FEKO> [9 september 2019]

en högre radarmålearea. Sömmens riktning relativt polarisationsriktningen har också betydelse. Arbetet beskrivs utförligt referens<sup>22</sup>. Arbetet har relevans även för andra typer av avbrott så som svetsfogar, glipor m.m.

## 6.2 Nya material inom radarområdet

Inom ramen för detta FoT-projekt har beredning av EDA-projektet ALOCAS genomförts. Projektet är en fortsättning av de föregående EDA-projekten *Advanced Low Observable Materials* (ALOA) och ALOMAS, i vilka FOI framgångsrikt har deltagit. Arbetet innefattar specifikation av tekniskt innehåll, författande av ansökan (*Research Technical Proposal*), planering av finansiering och administration samt möten med övriga deltagande organisationer. FOI:s deltagande i ett av projektets arbetspaket, kommer att finansieras av FoT<sup>23</sup> inom ett nytt signaturmaterialprojekt.

ALOCAS ska studera lågsignaturmaterial inom både radarområdet och det optiska området genom samarbetet mellan industri och forskningsinstitut i Tyskland, Sverige och Nederländerna. Deltagande organisationer är:

- Saab AB (koordinator, Sverige)
- Airbus DS (Tyskland)
- AkzoNobel (Nederländerna)
- FOI (Sverige)
- NLR (Nederländerna)
- Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB, Tyskland).

Nedan följer korta beskrivningar av syftet med ALOCAS samt av arbetselement WE4200.

Teknik för ”*stealth*-material” kommer att utvecklas med syfte att förbättra överlevnaden för framtida militära plattformar under 2000-talet. Signaturanpassning (eng. *low observable technology*, LO) är en fundamental del av de flesta framtida flygande och marina vapensystem. Även för lågsignaturmål inom radarområdet, som tidigare har dominerats av specifika krav på formgivning, spelar signaturmaterial en mycket viktig roll.

Arbetet innefattar bl.a. multispektrala LO-beläggningar, utveckling av nya koncept för tillverkning av radarabsorberande material och strukturer samt utveckling av framtida koncept för signaturmaterial avsedda för flyg- och marintillämpningar.

FOI är föreslaget att leda arbetselementet WE4200 ”*New LO concepts*”. Arbetselementet fokuserar på utveckling av lätta radarabsorberande material baserade på veckade strukturer. Ett långsiktigt mål inom forskningsområdet är att åstadkomma lätta radarabsorberande strukturer med stor bandbredd. Arbetet innefattar design, tillverkningsaspekter och karakterisering av material genom bl.a. modellering och beräkningar av elektromagnetiska materialegenskaper samt karaktärisering av dessa med hjälp av mätningar.

---

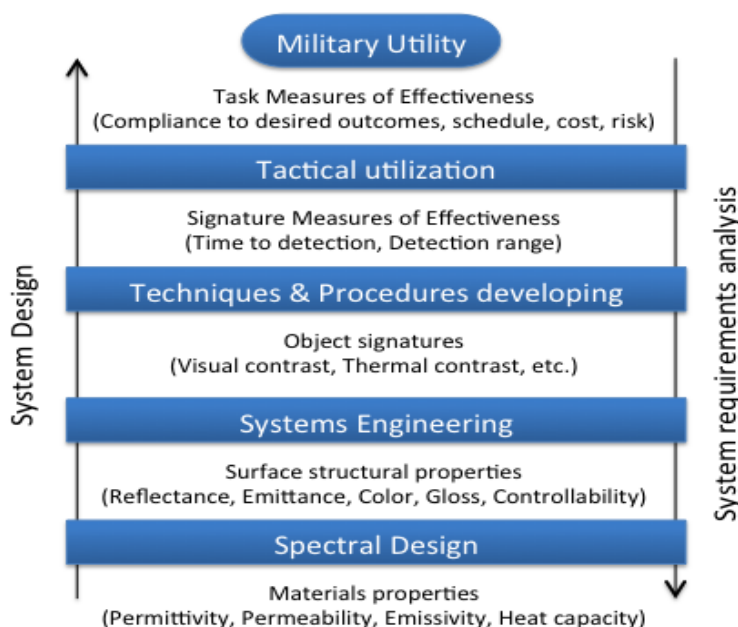
<sup>22</sup> M. Gustavsson, Å. Andersson, P. Glendor, R. Jonsson, M. Karlsson, N. Karlsson, ”*Metodutveckling för radar-målyteberäkning av objekt med mobilt maskeringssystem, MCS*,” FOI-RH--2008--SE, (2018)

<sup>23</sup> Förankrat hos FoT-gruppsordförande respektive forskningsområdesföreträdare för *Sensorer och Signaturanpassning* samt avdelningschef vid FOI Ledningssystem.

## 7 Den militära nyttan

Den militära nyttan med spektral design har doktor Kent Andersson beskrivit i sin avhandling ”*On the Military Utility of Spectral Design in Signature Management: A Systems Approach*”<sup>24</sup>. Doktorsarbetet genomfördes som ett samarbete mellan FOI och den finska försvarshögskolan National Defence University. Kent Andersson disputerade den 11 april 2018.

Avhandlingen relaterar spektral design till militär nytta genom att lyfta fram ett militärt förmågecentrerat systemperspektiv och tillämpa metoder från flera grenar inom militärvetenskapen. Ett konkret bidrag från Kent Anderssons arbete är den s.k. stegmodellen som genom sina olika tekniker och systemnivåer länkar samman grundläggande materiefysik, reflektioner från ytbeläggningar och hur dessa avspeglas i militär nytta på en högre systemnivå, vilket också Andersson visar exempel på i sitt doktorsarbete. Denna illustreras i figur 10.



Figur 10. Stegmodellen ger en översikt av systemtänk för materialval inom spektral design för signaturanpassning.<sup>24,25</sup>

Exempelvis: när man vill säkerställa att ett objekt har en viss militär förmåga, tex en viss upptäckttid med värmekamera, ställer det krav på beteende i en taktisk situation och objektets termiska signatur. För att reducera den termiska kontrasten behöver man ha kontroll och kännedom om objektets ytegenskaper, (vilket är en beskrivning på systemnivå), vilka påverkar såväl reflektans, emittans och styrbarhet, som exempel. För att säkerställa att tex reflektans och styrbarhet blir så som önskat är valet av material avgörande. Ett materials

<sup>24</sup> K. Andersson, “*On the Military Utility of Spectral Design in Signature Management: A Systems Approach*,” Finska Försvarsuniversitetet, Serie 1: Research Publication Nr. 21 (2018).

<sup>25</sup> K. E. Andersson, C. Åkerlind, “*A review of materials for spectral design coatings in signature management applications*”, SPIE Proceedings Volume 9253, Optics and Photonics for Counterterrorism, Crime Fighting, and Defence X; and Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XI; 92530Y (2014) <https://doi.org/10.1117/12.2067167> (FOI-S—4843--SE)

inneboende egenskaper så som tex permittivitet och permeabilitet (ibland uttryckt som brytningsindex) samt värmeledningsförmåga är alltså avgörande för att i systemdesignen slutligen åstadkomma efterfrågad militär förmåga. Stegmodellen är tänkt att kunna användas både vid systemdesign och som en hjälp vid kravsättning av system för att balansera behov och design på olika systemnivåer.

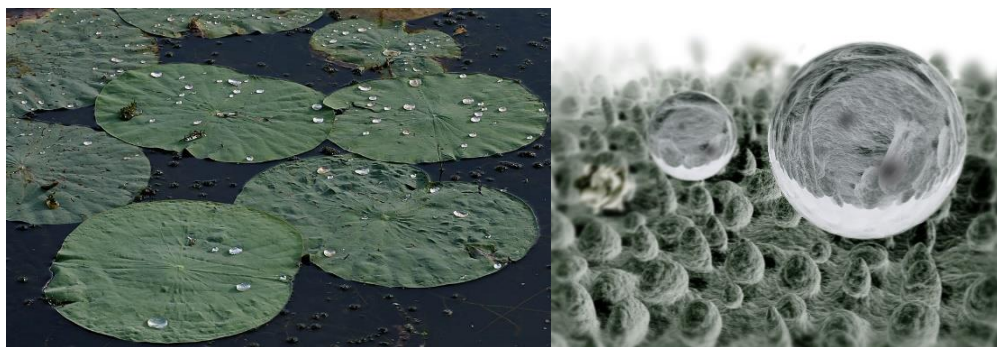
## 8 Smutsavstötande ytor

Frågan hur och om smuts påverkar effektiviteten hos en kamouflerande yta har diskuterats men inte studerats noga. Inom signaturmaterialprojektet har en litteraturstudie genomförts för att undersöka smutsens påverkan närmare. Smuts, exempelvis damm, jord, lera och organiska beläggningar såsom biotillväxt, kan förväntas bidra positivt till signaturanpassningen av ett objekt *så länge bakgrunden och smutsen har liknande färg*. Smuts skulle även kunna bidra till sänkt reflektion vid belysning i låga vinklar då en smutsig yta kommer att få små ojämnheter vilket motverkar spekulär spridning. Dock är ”verkningsgraden” av smuts okänd och inte kontrollerbar. Därmed bör smuts som kamuflage i bästa fall betraktas som en nödlösning.

Smuts på en lågemissiv beläggning förväntas höja ytans termiska emission och bör således undvikas då IR-signaturen kommer att öka. Därmed är det intressant att studera hur en yta kan hållas ren vid användning. Att hålla en yta ren har länge studerats för diverse civila tillämpningar, från vindrutor och lack på personbilar till sanitetsporlin. På senare år har även beläggningar för att minimera isbildning på bladen av vindkraftverk studerats.

Isbildning och smuts kan minimeras på ytor genom att göra dem superhydrofobiska, dvs kraftigt vattenavvisande. Smuts och vatten rinner därmed lätt av ytan och fastnar inte. Superhydrofoba ytor har studerats flitigt, men ett stort bekymmer har varit att skapa ytor eller beläggningar som är robusta nog att tåla normal användning<sup>26</sup>. Det finns nu hydrofoba produkter på marknaden (exempelvis duschskärmar) som visar att det kan finnas kommersiella lösningar, åtminstone på omålade och hårda ytor. Hur effektiva de är som smutsavstötande ytor har inte studerats inom projektet.

Det är oklart om en kamouflerande yta som är smutsig är lika effektiv som samma yta när den är ren. Studier bör göras på detta och om effektiviteten skulle visa sig bli försämrad bör man överväga att studera om superhydrofobiska beläggningar kan fungera för att hålla ytan ren och i så fall hur beläggningen påverkar ytans kamouflerande funktion.



Figur 11. T.v.: Lotusblommans blad efter regn. Regndropparna har ansamlats i större vattendroppar som kan rulla av blombladen.<sup>27</sup> T.h.: Mikroskopibild av vattendroppar på de pyramidformade knopparna på ett lotusblad.<sup>28</sup>

<sup>26</sup> Peng *et al.* “All-organic superhydrophobic coatings with mechanochemical robustness and liquid impalement resistance”, *Nature Materials*, Vol. 17, ss. 355–360 (2018)

<sup>27</sup> By J.M.Garg – Own work, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7249919>.

<sup>28</sup> Mikroskopibild av William Thielicke på <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lotus2mq.jpg>. Published under the “GNU Free Documentation License” and the “Creative Commons Attribution ShareAlike license” CC BY-SA-3.0.

## 8.1 Tekniska lösningar

TVå olika principer studeras för att skapa superhydrofobiska ytor, dels de som bygger på kemiska föreningar med låg ytenergi som typiskt innehåller fluor och dels de som bygger på ytstrukturer som liknar mikroskopiska pyramider. Lotusbladen använder båda principerna, dvs mikroskopiska utbuktningar (dessutom vid två olika längdskalor, på mikro- och nanometerskala) som är täckt med ett vaxliknande organisk material, se figur 11. Det är välkänt att vatten på ett lotusblad rinner av vid den minsta lutning, och vattendropparna drar med sig eventuella smutspartiklar.

Att skapa en konstgjord superhydrofobisk yta kan göras exempelvis genom att spruta på en suspension innehållande mikroskopiska partiklar i ett bindemedel eller en lösning som när den torkar faller ut mikroskopiska partiklar som fastnar på ytan, med eller utan en fluorhaltig ytbeläggning. Den senare kan även appliceras i ett andra steg, kanske för att underhålla ytan. En yta kan även etsas för att skapa ojämnheter av lämplig storlek, exempelvis genom plasmaetsning.

Det är inte känt om studier av kamouflerade ytor med superhydrofobiska beläggningar har gjorts tidigare men en enklare litteratursökning visar inga tecken på att så är fallet. Dock finns det indikationer på att tanken finns, särskilt när det gäller ytor som får sina färger från strukturen (eng. *structural colour*).

## 9 FoU-trender med relevans för signaturanpassningsteknik

Investeringar i forskning och utveckling (FoU) inom materialteknik för civila ändamål fortsätter och kommer sannolikt att öka i framtiden. Planerade European Defence Fund (EDF) förväntas innehålla ett flertal aktiviteter som berör både materialteknik och kamouflage, och EU uppmärksammade materialteknik som ett viktigt dual-use teknikområde genom en serie workshops under 2019. Även militärt uppmärksammas materialteknikens växande betydelse<sup>29</sup>.

De civila investeringarna motiveras och drivs av de stora utmaningarna i samhället som kräver:

- effektivare transporter (lättare och starkare konstruktionsmaterial)
- energiframställning, lagring och distribuering (exempelvis solceller, snabbbladdande batterier, ultrakondensatorer)
- energibesparing (exempelvis termisk isolering, passiv kylning, lågfriktytor)
- miljövänliga material som ytskikt på många olika typer av ytor för allt från att hindra is att fastna (isfobiska) till ytor som är lätt att rengöra (superhydrofobiska)
- optiska beläggningar såsom antireflexbehandlings
- sensorer för sakernas internet (eng. *Internet of Things*, IoT)
- bättre material för sjukvårdsprodukter
- minskade förbrukning av s.k. kritiska råvaror och miljöfarliga ämnen samt ökande återvinning i alla led.

Många av dessa material kan användas i militära system. Särskilt bör nämnas material som används i ytbeläggningar för s.k. smarta fönster, dvs transparenta beläggningar som ändrar färg eller mängden ljus som transmitteras eller reflekteras beroende på väder. Sådana material är användbara inom adaptivt kamouflage.

Intresset för material som kan användas inom kamouflage och signaturanpassning fortsätter att öka. Trenden är tydlig bland ”användarna” men även bland materialforskare på universitet, högskolor och forskningsinstitut. Material för avskärmning (eng. *electromagnetic shielding*, EMI) nämns speciellt, oftast tillsammans med grafen och/eller övriga tvådimensionella material såsom den nya materialgruppen MXenes. Intresset från materialforskare kan bero på uttrullning av 5G-teknik, men även ett växande intresse för THz-teknologier. De flesta resultat som publiceras bör dock granskas noga då det förekommer att forskare misstolkar betydelsen av sina resultat. Mätutrustning har blivit billigare och det är relativt enkelt att mäta i THz-området, men det extremt svårt att mäta på ett korrekt sätt och att tolka resultaten korrekt.

Antalet publikationer inom materialteknik (inom alla områden) från forskare verksamma i Asien ökar och speciellt Kina investerar stora resurser på forskning inom området.

Övriga trender som är värda att notera är framsteg inom syntetisk biologi (eng. *synthetic biology*) som fortfarande är på grundforskningsnivå och eng. *integrated computational materials engineering* (ICME) där datormodeller beräknar materialegenskaper hos helt nya materialsammansättningar utan att materialet behöver framställas. På det sättet kan man hitta nya material med nya egenskaper och kombinationer av egenskaper utan behov av tidskrävande experiment. Det är värt att notera det förutsågs att grafen skulle uppvisa

---

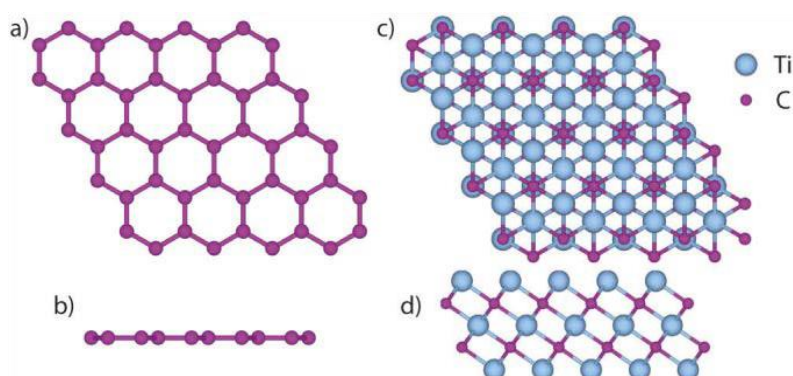
<sup>29</sup> Se exempelvis <https://www.hoover.org/research/emerging-technologies-and-national-security-russia-nato-european-theater>

extraordinära elektroniska egenskaper så tidig som 1947<sup>30</sup>, långt innan materialegenskaperna kunde påvisas genom experiment. Än så länge har ICME mest riktats mot metalliska legeringar för krävande tillämpningar, exempelvis inom flyg, och material för energilagring, men liknande metoder skulle kunna användas för att beräkna exempelvis optiska egenskaper hos okända material.

## 9.1 Textilier

Ytterligare ett materialområde med stor betydelse är textilier, inklusive ytbeläggningar, för s.k. funktionskläder (eng. *wearable technologies*). De kan monitorera bärarens hälsa, geografisk position, graden av utmattning, omgivning (skadliga kemikalier, ljus), m.m. Förutom monitorering kan ljusemitterande trådar vävas, stickas eller sys in i textilier och skapa så kallade elektroniska tyger (e-tyger). Dessa används inom exempelvis modeindustrin men skulle kunna användas som adaptivt kamouflage. Dessa tyger är även ett stort område för idrottare, där de kan användas för att reglera exempelvis bärarens kroppstemperatur. I och med intresset från modeindustrin och sportindustrin finns en stor drivkraft att fortsätta utveckla dessa tyger också skulle kunna utnyttjas i den militära sektorn.

Som nämns ovan finns civil FoU som kan ha stor betydelse för militära tillämpningar. Resultaten publiceras i många fall helt öppet och är tillgängliga för alla. Det är ekonomiskt fördelaktigt att följa och framförallt allt utvärdera dessa resultat mot militärt behov. I dagsläget genomförs detta dock sällan, och då det görs är insatsen punktvis, slumpmässigt och osystematisk, då det saknas metoder för att utvärdera mot militära behov. Inom den civila sektorn finns system och verktyg för att löpande följa och utvärdera forsknings- och utvecklingsresultat och det skulle vara fördelaktigt att ha ett liknande system för militära tillämpningar.



Figur 12. Schematisk bild av de tvådimensionella materialen grafen (a,b) och MXene  $\text{Ti}_3\text{C}_2$  (c,d) sedda ovanifrån (a,c) och från sidan (b,d).<sup>31</sup>

<sup>30</sup> P.R. Wallace, "The Band Theory of Graphite", Physical Review, Vol. 71, Nr. 9, ss: 622–634 (1947)

<sup>31</sup> L. Karlsson, "Transmission Electron Microscopy of 2D materials: Structure and surface properties", Linköping Studies in Science and Technology. Dissertations, No. 1745, LiU Tryck (2016). Upphovsrättsinnehavare. Linda Karlsson. Använd med tillstånd från upphovsrättsinnehavare.

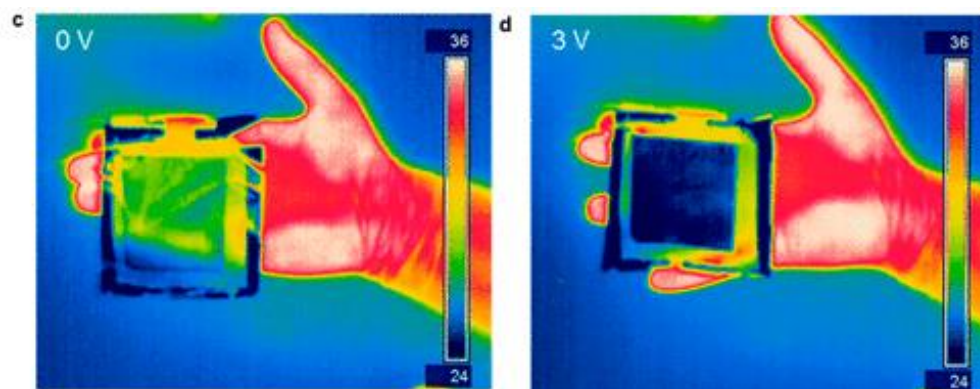


## 9.2 Tvådimensionella material

På grund av de fortsatt ökande forskningsinsatserna på grafen och andra tvådimensionella material har FOI ökat bevakningen av den civila forskningen och produktutvecklingen. Det görs genom deltagande i styrelsearbete, nationella och internationella konferenser, möten och seminarier. Bland alla tvådimensionella material som studeras finns det två som är extra intressanta ur militär synpunkt: grafen och MXenes, se figur 12 för illustration av materialen. Dessa har valts ut då de är bland de mest studerade materialen under de senaste åren i områden som kan vara militärt intressanta och där forskningen har högst TRL-nivå. Deras optiska och infraröda egenskaper har studerats mest av alla tvådimensionella material.

### 9.2.1 Grafen

Grafen består av ett enda lager grafit, vilket är illustrerat i figur 12a,b. Materialet har ett antal extraordinära egenskaper som gör det intressant för en mängd tillämpningar inom bl.a. energi, sensorer och optik. Grafen är på grund av sin optiska transparens, höga elektriska och termiska ledningsförmåga intressant som kamouflagematerial för nästan alla våglängder, för exempel se figur 13.



Figur 13. Grafens termiska emission kan kontrolleras genom att variera spänningen över dopad grafen<sup>32</sup>.

FOI har sedan 2015 en representant i styrelsen för SIO Grafen, ett svenskt innovationsprogram finansierat av Vinnova, Formas och Energimyndigheten. Innovationsprogrammet arbetar för att skapa och stötta grafenbaserad industri i Sverige. Redan i dag finns flera företag nationellt och internationellt som tillverkar grafen och grafenbaserade produkter. Sedan starten har SIO Grafen två till tre nationella möten och ett antal workshops och seminarier per år där FOI deltagit.

Andra konferenser med fokus på grafen där FOI deltagit är:

- Graphene Week, Helsingfors, Finland 23–27/9 2019
- NATO Graphene technologies and applications for defence, Trondheim, Norge 10–11/10 2019.

<sup>32</sup> O. Salihoglu *et al.*, *Nano Letters*, Vol. 27, Nr. 6, ss 4541–4548 (2018). Adapted with permission from O. Salihoglu *et al.*, *Nano Letters*, Vol. 27, Nr. 6, ss. 4541–4548 (2018). Copyright 2018 American Chemical Society

Från dessa konferenser är det tydligt att forskningen och utvecklingen kring grafen fortfarande är mycket intensiv, men intresset för andra tvådimensionella material har ökat kraftigt. Dessa material har egenskaper som kompletterar grafens och materialen kan därmed användas tillsammans. Forskningen kring s.k. lagrade strukturer, där man använder sig av grafen tillsammans med hexagonal bornitrid (hBN), MXenes eller kalkogenider (eng. *transition metal dicalchogenides*, *TMD*), speciellt inom optoelektronik, ökar kraftigt. Inom optoelektronikforskningen är både ljusemitterande och ljusregistrerande tvådimensionella strukturer relevanta och skulle kunna bli intressanta för signaturanpassning när tekniken har nått en högre mognad.

### 9.2.2 MXenes

MXenes är en relativt ny materialgrupp snarlik grafen, se figur 12c,d. Egenskaperna kan kontrolleras genom att byta ut materialen som bygger upp MXenet och atomer/molekyler på dess ytor. Materialet är kemiskt stabilt, kan blandas med vätska för att bilda en formbar, elektriskt ledande lera eller en spraybar vätska. Enligt studier är vissa typer av MXene mindre känsligt för radioaktiv strålning än andra material. Forskning visar också att materialet skulle kunna användas som THz-skärmning och för tunna radiofrekvens-antennerna. Forskare har även lyckats skapa MXene med olika färger och kunnat kontrollera färgerna. Än så länge har få studier på MXenes optiska och infraröda egenskaper genomförts, men de initiala studier som genomförts visar att materialgruppen även i fortsättningen bör bevakas.

## 9.3 Adaptivt kamouflage

Inom signaturanpassning skulle adaptiva material kunna användas på soldaters utrustning och fordon för att dölja dem under förflyttning eller då omgivningen ändras, exempelvis vid träd och buskars rörelser eller ökad/minskad molnighet. För att undersöka mognadsgraden hos adaptiva material genomfördes en litteraturstudie av vetenskapliga publikationer och patent mellan åren 2015–2018. Studien genomfördes i samverkan med EU PADR-projektet ACAMSII. Denna studie presenterades på *NATO SCI-319 RSY on Signature Management* i Brno, Tjeckien, 7–8 maj 2019<sup>33</sup>. En sammanfattning ges nedan där de mest studerade materialen och teknikerna beskrivs.

Adaptiva material kan ändra egenskaper, såsom färg och färgstyrka, som en reaktion på förändringar i omgivningen, exempelvis temperatur eller ljusintensitet. Som adaptiva material räknas dels material som själva ändrar egenskap, exempelvis vanadiumoxid som ändrar färg vid ändrad temperatur, men också skärm-kamerasystem, exempelvis LED-skärmar som ändrar bild efter signaler från en kamera som filmar bakgrunden.

---

<sup>33</sup> L. H. Karlsson och H. Kariis, "Materials and structures with potential for adaptive signature management", NATO SCI-319 RSY on Signature Management, Brno, Tjeckien, STO-MP-SCI-319, DOI: 10.14339/STO-MP-SCI-319 (2019) (FOI-SH--0257--SE)



Figur 14. Kommersiella böjbara LED-lister som kan sända ut ljus i många olika färger och ljusstyrkor.

Inom civil forskning och utveckling pågår ett stort arbete med att ta fram tunna, böjbara skärmar och små ljuskällor som kan integreras i exempelvis kläder eller placeras på fordon för både visuella eller infraröda våglängdsområdet, eller en kombination av båda. Exempel på böjbara ljuskällor kan ses i figur 14. Utvecklingen inom det visuella området ligger mycket längre fram än det infraröda området då det finns ett stort utbud av små och lätta visuella skärmar och ljuskällor att utgå ifrån. I dagsläget är fortfarande infraröda strålkällor stora, tunga och otympliga.

Inom den militära tillämpningen finns en stor bredd på patent och publikationer. Forskningen och utvecklingen sker både inom det visuella och det infraröda våglängdsområdet, samt kombinationen av båda. Inom det visuella området är användning av LED, organisk LED (OLED) och elektroniskt bläck (E-bläck) populärast. Figur 15 visar två försök med LED-matriser framför olika bakgrunder. I de flesta patent inom det infraröda området utnyttjas olika typer av värmeöverföring från ett område till ett annat på ett objekt, exempelvis Peltierelement och vattenkyllning. Kombinationen av infrarött och visuellt använder dessa tekniker i kombination.



Figur 15. Försök med vit LED från NATO SCI-179 i två olika bakgrunder.

## 9.4 Möjliga synergier mellan civil FoU och militära behov

Ytbeläggningar som minskar värmeförluster från byggnader och tak, dvs lågemissiva beläggningar, kan användas för att sänka värmesignaturen från fordon och fartyg. Principerna som används i ytbeläggningar som ökar värmeförluster i smala våglängdsfönster, s.k. passiv kylning kan möjligtvis användas för att sänka temperaturen på fordon, fartyg eller komponent utan att bidra till signaturen, men tekniken är i ett tidigt stadium. Ytbeläggningar som används i smarta fönster för att styra reflektion eller transmission av VIS–IR-våglängder är mogen och civila produkter finns. Det verkar vara sannolikt att liknande ytbeläggningar kan användas inom adaptiv kamuflage.

Inom området funktionella textilier görs stora framsteg, där ytbeläggningar för att skydda mot väta, kyla, bakterier och insekter utvecklas. Ibland kallas området för multifunktionella textilier. Det ska inte förväxlas med smarta textilier, där inbyggda sensorer, energikällor (batterier eller superkondensatorer), energigenerering (eng. *energy harvesting*, dvs att tillvarata gratis energi från omgivningen) kan ha betydelse för ”den uppkopplade soldaten”. Det bedrivs även forskning och utveckling på textilier där värmeöverföring kan styras för att på så sätt hindra bäraren från att förlora för mycket värme eller från att överhettas.

Potentialen att hitta och utnyttja synergier mellan materialutveckling för civila ändamål och militära tillämpningar bör undersökas närmare. Detta kräver ett ändrat synsätt då det inte är självklart att exempelvis material för smarta fönster kan användas som adaptivt kamuflage. Forskning och utveckling för militära tillämpningar skulle underlättas om det fanns ett större kunskapsutbyte mellan militära och civila forskare inom materialteknik.

## 10 Slutsatser

Utvecklingen inom materialteknik går fort och nya material med unika och förbättrade egenskaper utvecklas kontinuerligt, speciellt i den civila sektorn. Denna utveckling har bevakats genom deltagande i internationella samarbetsprojekt, konferenser, litteraturstudier och styrelsearbete. Även ett stort antal informella kontakter med universitet, forskningsinstitut och industri har varit verktyg i bevakningsarbetet.

Material vars optiska och elektromagnetiska egenskaper kan förändras snabbt med en styrsignal kan vara till militär nytta i en föränderlig omvärld. Speciellt har adaptiva kamouflagesystem för soldater studerats i samverkan med ett EU PADR-projekt. Såväl aktiva som passiva system har studerats. Teknologierna tros komma till militär nytta men TRL-nivåerna är fortfarande låga (2–4).

Ytors reflektansegenskaper kan designas för att passa för en given bakgrund i militär tillämpning. Detta gäller även i våglängdsområden som tidigare inte varit intressanta för signaturanpassning. I IR-området är det viktigt att anpassa emitterad strålning efter omgivningens temperatur. Detta kan åstadkommas genom en väl vald ytstruktur. Studier av biologiska system kan ge inspiration till material och strukturer för kamouflage i olika miljöer och årstider. Samarbete sker med civila universitet.

I radarområdet kan lämpliga materialval ge en lagom stor radarabsorption. En korrekt avvägning mellan radarabsorption och –reflektion kan minimera radarsignaturen. Studerade optimeringsmetoder kan tillämpas på befintlig samt framtida signaturanpassningsmaterial.

Metoder för värdering av signaturanpassningens effektivitet behövs för att kunna estimeras den militära nyttan med förändrade signaturer och sensorer. Sådana metoder har tagits fram tillsammans med Försvarshögskolan.

Den mesta materialtekniska utvecklingen sker civilt men för att ge en optimal militär nytta behövs ytterligare fördjupade studier inom materialteknik och dess militära tillämpningar. Vi ser redan att material som endast studerades i laboratorier för tjugo år sedan kommer in i tillämpningar, exempelvis grafen, litium-jonbatterier, multilagerstrukturer, kvantprickar. Inget tyder på att den utvecklingen kommer att avstanna, utan den kommer snarare att accelerera.

Sammanfattningsvis har vi besvarat de frågeställningar som uttryckts i projektets syfte.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 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, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



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)