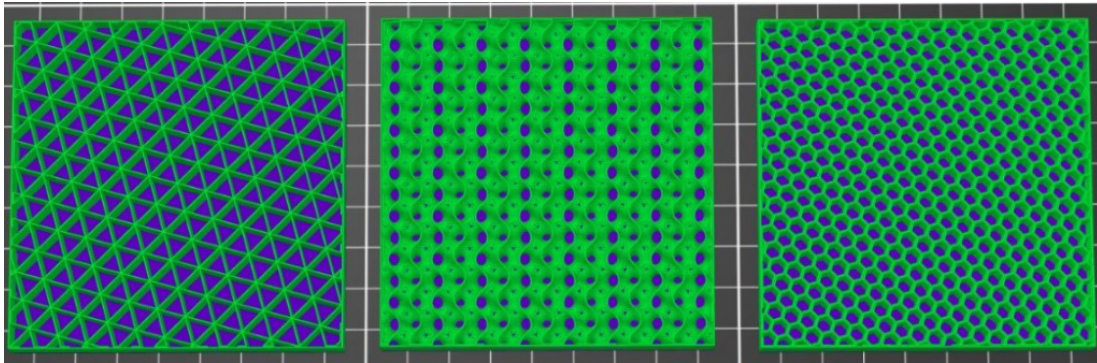


STEFAN KARLSSON (RED.), PETER REJMSTAD, EVELINE ÖRTENBERG, MATHIAS FORSBERG, JENNIFER SILANDER, JHANZAIB HUMAYUN, KRISTOS QIQI, LINNEA SERRANDER, MARTIN FORSGREN, ANTONIA TENGBOM, ÅSA ANDERSSON, HANS KARIIS, JAN FAGERSTRÖM, TOMAS HALLBERG, CHRISTINA ÅKERLIND



Stefan Karlsson (RED.), Peter Rejmstad, Eveline Örténberg, Mathias Forsberg, Jennifer Silander, Jhanzaib Humayun, Kristos Qiqi, Linnea Serrander, Martin Forsgren, Antonia Tengbom, Åsa Andersson, Hans Kariis, Jan Fagerström, Tomas Hallberg, Christina Åkerlind

## Signaturmaterial 2023–2025

Slutrapport

Titel	Signaturmaterial 2023–2025 – Slutrapport
Title	Signature materials 2023–2025 – Final Report
Rapportnr/Report no	FOI-R--5802--SE
Månad/Month	12
Utgivningsår/Year	2025
Antal sidor/Pages	45
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E51576
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Telekrig

Bild/Cover: Tre olika fyllnadsmönster för 3D-utskrifter: triangles, gyroid och honeycomb.

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

Rapporten sammanfattar verksamheten inom projektet Signaturmaterial som pågått under tidsperioden 2023–2025. Signaturmaterial är ett FoT-projekt med syfte att bedriva kunskapsuppbyggande verksamhet genom att studera nya material med potential inom signaturanpassning och följa materialforskning i omvärlden. Arbetet har bedrivits dels genom egna studier av material men även genom internationella samarbeten, konferensdeltagande och i samverkan med universitet och näringsliv. Målgruppen för rapporten är primärt Försvarsmakten men även andra potentiella intressenter. Rapporten riktar sig till de som är intresserade av signaturmaterial för alla typer av försvarstillämpningar.

Avancerad sensorteknologi utgör idag ett stort hot avseende upptäckt och därför behöver utvecklingen av signaturanpassning också utvecklas i takt med sensorteknologin. Hur material uppfattas i kontrast mot sin bakgrund är avgörande och har studerats i flera olika våglängdsområden för att få förståelsen för signaturmaterials multispektrala beteenden. Materialen som studeras är valda utifrån egen kunskap men även nya material har undersökts för att ta reda på dess relevans inom signaturmaterial. Idag och än mer i framtiden finns ett behov av att designa signaturmaterial för att anpassa till multispektrala signaturer.

Slutsatser ifrån tidsperioden 2023–2025 är att materialvetenskap i generell bemärkelse bör följas i och med att nu satsas även forskningsfinansiering på material för militär tillämpning. Utöver det är det viktigt att kunna bedöma och verifiera materialegenskaper för att kunna bedöma om material är lämpliga som signaturmaterial. Rekommendationer inför framtiden är att undersöka om det går att väga samman enkla mått genom mätning/beräkning/simulering, med syfte att jämföra olika signaturmaterial för olika tillämpningar.

FoT Signaturmaterial avser att arbeta vidare med frågeställningarna och primärt bedriva kompetensuppbyggnad inom modellering och simulering av materialegenskaper samt parametrar för signaturanpassning. Genom förvaltning av åtaganden i samarbeten och i samverkan med andra FoT-projekt avser FOI även att bedriva verksamhet inom mätmetodik, additiv tillverkning av signaturmaterial, biologiskt nedbrytbara material för skennål och styrbara signaturmaterial.

Nyckelord: Signaturmaterial, Signaturanpassning, Kamouflage, Radarabsorberande material, Materialteknik, Multispektral, Lågemissiva material, Passiv kylning, 2D material, Polarisation, Optiska antenner, Maskininlärning, Militär nytta, Mätteknik.

## Summary

The report summarizes the activities within the project Signature Materials that have been ongoing during the period 2023–2025. Signature Materials is an FoT-project with the purpose to build competence by studying new materials with the potential to be used for defense applications in signature adaptation and follow relevant materials research. The work has been conducted partly through own experimental studies of materials but also through international collaborations, conference participation and in collaboration with universities and industry. The target group of the report is primarily the Swedish Armed Forces but also other potential stakeholders. The report is aimed at those who are interested in signature materials for all types of defense applications.

Advanced sensor technology today provides good opportunities for discovery and therefore the development of signature adaptation also needs to develop in step with modern sensor technology. How materials are perceived in contrast to their background is one of the main tasks. This has been studied in several different wavelength ranges to gain an understanding of signature materials multispectral behaviors. The materials studied are selected based on own knowledge, but new materials have also been investigated to find out their relevance within signature materials. Today and even more so in the future, there is a need to design signature materials to adapt to multispectral signatures.

Conclusions from the period 2023–2025 are that materials science in general should be followed, as research funding is now also being invested in materials for military applications. In addition, it is important to be able to assess and verify material properties in order to assess whether materials are suitable as signature materials. Recommendations for the future are to investigate whether it is possible to weigh together simple measures through measurement/calculation/simulation, with the aim of comparing different signature materials for different applications.

FoT Signature Materials intends to work further on the issues and primarily build competence modelling and simulation of material properties and parameters for signature adaptation. Through management of commitments in collaborations and in collaboration with other FoT projects, FOI also intends to conduct activities in measurement methodology, additive manufacturing of signature materials, biodegradable materials for dummy targets and adaptable signature materials.

Keywords: Signature materials, Signature adaptation, Camouflage, Radar absorbing materials, Materials technology, Multispectral, Low emissivity materials, Passive cooling, 2D materials, Polarization, Optical antennas, Machine learning, Military utility, Measurement technology.

## Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Inledning .....</b>	<b>6</b>
1.1	Bakgrund och militär nytta .....	6
1.2	Frågeställningar .....	7
1.3	Metoder för att besvara frågeställningarna.....	7
1.4	Läsangivelser.....	7
<b>2</b>	<b>Omvärldsbevakning.....</b>	<b>8</b>
2.1	Nätverk och forum för omvärldsbevakning.....	8
2.2	Nationell omvärldsbevakning inom akademi och institut .....	10
2.3	Internationell omvärldsbevakning.....	12
<b>3</b>	<b>Slutsatser och rekommendationer till Försvarsmakten .....</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>Mätteknik och metodutveckling .....</b>	<b>16</b>
4.1	Elektrooptiska spektrala mätningar .....	16
4.2	Radar mätningar .....	17
4.3	Kemilabb .....	19
4.4	Kulkvarn .....	19
4.5	Värmeledning.....	20
4.6	Artificiell Intelligens (AI) .....	21
<b>5</b>	<b>Kunskapsuppbyggnad .....</b>	<b>22</b>
5.1	Material för spektral signaturanpassning.....	22
5.2	Radarabsorberande material.....	26
<b>6</b>	<b>Kompetensutveckling.....</b>	<b>28</b>
6.1	Kurs om färg och ytbeläggningsteknologi .....	28
6.2	Kurs hos Retsch om malning med kulkvarn .....	29
6.3	Seminarium med Prof. Daniel Aili.....	29
6.4	Studiebesök Linköpings universitet i Norrköping .....	29
6.5	Studiebesök Sverige Lantbruksuniversitet, Uppsala.....	29
6.6	Spektroskopi för strukturegenskapskorrelationer .....	29
<b>7</b>	<b>Samverkan .....</b>	<b>31</b>
7.1	Nationell .....	31
7.2	Internationell .....	31
<b>8</b>	<b>Kunskapsspridning.....</b>	<b>34</b>
8.1	Examensarbeten.....	34
8.2	Konferensbidrag .....	34
8.3	Tidsskriftspublicationer .....	34
8.4	Övrig kunskapsspridning .....	35
<b>9</b>	<b>Framtida arbete .....</b>	<b>36</b>
<b>10</b>	<b>Referenser.....</b>	<b>37</b>

# 1 Inledning

Projektet Signaturmaterial är ett Forskning och Teknik (FoT) projekt inom området Sensorer och Signaturanpassning (SoS)<sup>1</sup>. Projektet syftar till att bevaka materialutveckling, civilt som militärt, med relevans för signaturanpassning, samt bygga och upprätthålla kompetens för att omsätta kunskaper till behov för Försvarsmakten. Sensorteknik för att upptäcka militärt intressanta mål är idag avancerad vilket gör att signaturanpassning behövs till flera olika våglängder. Generellt beaktas våglängdsområdena<sup>2</sup> UV, VIS, IR (som är indelat i NIR, SWIR, MWIR och LWIR) och radar (som är indelat i olika frekvensband<sup>3</sup>, t.ex. L, S, C, X, Ku, K, och Ka. Arbetet inom projektet är indelat i egen forskning, forskning i samverkan och omvärldsbevakning.

Projektets övergripande målsättning är att bygga och upprätthålla kompetens inom såväl experimentell teknik, mätteknik och beräkningsteknik. Det ingår även att underhålla utrustning och instrument. Detta för att kunna fortsätta vara en attraktiv samarbetspartner för såväl nationella och internationella samarbeten samt att fungera som en kunskapsbank för nationella försvarsrelaterade myndigheter och näringsliv. Effektmålet är att detta möjliggör utveckling av bättre material för signaturanpassning samt att FOI kan bidra till värdering av hållbarhet och kostnadseffektivitet som är kriterier till ökad överlevnad för svenska soldater i händelse av krig [1].

## 1.1 Bakgrund och militär nytta

Militärt har modern signaturanpassning med signaturmaterial använts under många årtionden, ett historiskt exempel är utvecklingen av kamouflagemönster M90 [2]. Syftet med signaturanpassning är att försvåra upptäckt och att vinna tid så att möjligheterna till att kunna utföra uppdraget ökar. En låg kontrast mot bakgrunden, dvs. omgivningen, sett ur en sensor, motsvarar en låg signatur och är det som eftersträvas vid signaturanpassning. Dagens snabba sensorutveckling ökar risken för att bli upptäckt och i framtiden behöver signaturanpassningen bli mer avancerad för att försvåra upptäckt, detta genom att signaturmaterialen behöver anpassas till fler våglängdsområden dvs. multispektralt eller rent av hyperspektralt, se definition av hyperspektral i ref [3,4]. I framtiden kommer signaturanpassning behöva ta hänsyn till även bl.a. kortvågs-IR (SWIR), ljuspolarisation, hyperspektrala sensorer och automatisk identifiering via maskininlärning.

Det är viktigt att upprätthålla kunskap och bygga kompetens inom materialvetenskap och materials interaktion med elektromagnetisk strålning för att förstå material för signaturanpassning. Samma typ av kunskap är viktig för utveckling och innovation för många civila tillämpningar vilket adresseras av både akademi, forskningsinstitut och näringsliv genom forskning och utveckling. För att bedöma om ett nytt material är relevant som signaturmaterial måste lämpliga materialegenskaper identifieras och mätas. Det kräver rätt kompetens och utrustning inom mätteknik, materialteknik och försvarsbehov. Det krävs också ett samarbete med lämpliga aktörer för att få tillgång till nya material som kan vara användbara i signaturanpassningsmaterial i olika typer av tillämpningar.

Materialforskning har varit ett område där Sverige har legat i framkant men har under 2017–2021 ett sämre citeringsgenomsnitt än världsgenomsnittet trots att man ökat antalet publikationer något [5]. 2009–2011 låg Sverige inte under världsgenomsnittet i något ämne. WISE (*Wallenberg Initiative Materials Science for Sustainability*) som finansieras av Knut och Alice Wallenbergs forskningsstiftelse (KAW) är den största investeringen i svensk materialforskning och löper under 2022–2033 med syftet att Sverige åter ska bli en ledande

<sup>1</sup> FoT-projektet Signaturmaterial är en del av samlingsbeställningen FoT SoS AT.9220425.

<sup>2</sup> ultraviolett (UV): 100 – 380 nm, visuellt (VIS): 380 – 750 nm, nära infrarött (NIR): 750 – 1000 nm, kortvågs-infrarött (SWIR): 1 – 2,5 µm, mellanvågs-infrarött (MWIR): 3 – 5 µm och långvågs-infrarött (LWIR): 8 – 12 µm eller 7 – 14 µm.

<sup>3</sup> Radarfrekvensbanden är definierade enligt standarden IEEE 521-2002.

nation inom materialvetenskap. Det är viktigt att följa svensk och europeisk materialforskning, dels för den intressanta forskningen och samarbetsmöjligheter men även för ev. framtida rekryteringsbehov.

## 1.2 Frågeställningar

Projektet har haft två primära frågeställningar under treårsperioden och aktiviteterna inom projektet syftar till att bidra med svar till dessa frågeställningar. Frågeställningarna lyder:

- Vilken utveckling inom civil materialvetenskap bedöms användbar för att förbättra signaturanpassning?
- Hur bör signaturmaterial designas för att vara effektiva, funktionella och framtidssäkrade?

Frågeställningarna besvaras specifikt i avsnitt 3 *Slutsatser och rekommendationer till Försvarsmakten*.

## 1.3 Metoder för att besvara frågeställningarna

För att utreda och besvara frågeställningen om vilken materialvetenskap som bedöms användbar för att förbättra signaturanpassning har följande arbeten och åtgärder vidtagits.

- Omvärldsbevakning – både nationellt och internationellt
- Kompetensutveckling för värdering av material och tillämpning av ny teknik
- Kompetensspridning
- Mätning och modellering

Utöver det har under våren 2025 även en intern workshop genomförts, med det primära syftet att sammanfatta svar på frågeställningarna, mer om det i avsnitt 5 *Kunskapsuppbyggnad*.

## 1.4 Läsangivelser

- I kapitel 2 beskrivs omvärldsbevakning.
- I kapitel 3 ges slutsatser och rekommendationer.
- I kapitel 4, 5 och 6 beskrivs FOI:s bedrivna verksamhet inom projekt med avseende på mätteknik och metodutveckling, kunskapsuppbyggnad och kompetensutveckling.
- I kapitel 7 beskrivs samverkan.
- I kapitel 8 beskrivs kunskapsspridning.
- I kapitel 9 beskrivs framtida arbete.
- I kapitel 10 ges referenser.

## 2 Omvärldsbevakning

Omvärldsbevakning görs dels kontinuerligt men även genom vissa specifika aktiviteter som listas nedan. Syftet är att hålla sig uppdaterad kring materialutvecklingen som sker dels i Sverige men även internationellt. Relevanta forskningsområden hos specifika lärosäten och institut beskrivs i detta avsnitt utan någon sorts inbördes ordning.

FoT Signaturmaterial tar även emot omvärldsbevakning genom FMV:s nyhetsbrev ”Framtid” som behandlar framtida tekniker och material samt gör en bedömning om det är något relevant att titta vidare på.

### 2.1 Nätverk och forum för omvärldsbevakning

I det här avsnittet beskrivs ett urval av olika nätverk och forum relevanta för omvärldsbevakning där FoT Signaturmaterial är med och bevakar.

#### 2.1.1 SIO Grafen

SIO Grafen är ett strategiskt innovationsprogram finansierat av Vinnova, Energimyndigheten och Formas och som syftar till att bygga kompetens och utveckling så att grafen blir ett svenskt styrkeområde. FOI deltar i SIO Grafen för att bevaka svenska aktörers aktiviteter inom grafen. FOI har en representant i styrelsen och eftersom SIO Grafen avslutas 2026 pågår arbete för en fortsättning bl.a. inom Färdplan Avancerade Material.

FOI deltar regelbundet i SIO Grafens aktiviteter, bland annat den årliga konferensen Grafen Forum där korta presentationer hålls från de som fått finansiering inom SIO Grafen via Vinnova, Energimyndigheten och Formas. Bland andra har Saab Barracuda presenterat studier de genomfört på kamouflage-material innehållande grafen. Andra företag har även studerat inblandning av grafen i bl.a. betong och limprodukter.

2023 genomfördes Grafen Forum-träffen i Lund, 2024 på Luleå tekniska universitet (LTU), och 2025 i Västerås.

#### 2.1.2 Materials for Tomorrow

Den årliga konferensen *Materials for Tomorrow* hålls i Göteborg på Chalmers tekniska högskola där temat på konferensen varierar från år till år. Medarbetare ifrån FOI deltog vid samtliga tre konferenser under perioden 2023–2025.

År 2023 var temat *Surface of things* vilket anspelade på begreppet *Internet of Things* (IoT). Bland annat presenterades hur ytan på material kan manipuleras för att förbättra prestanda inom olika områden, såsom bioteknik, biomedicin, energi och lantbruk. Denna typ av forskning kan exempelvis tillämpas inom biosensorer för t.ex. medicinsk diagnostik och detektion av narkotika eller sprängämnen. Ytegenskaper inom energibranschen diskuterades bland annat av I-Tech som tillverkar en selektiv biocid för ett färgsystem hos marina plattformar. Produkten Selektope® presenterades som ett mer miljövänligt alternativ, genom att biociden endast verkar mot den specifika art som fäster på fartygets skrov och minskar även bränsle-förbrukningen hos fartyget genom en minskad friktion.

Temat för 2024 var *AI meets materials science* där konferensen inleddes med en workshop som gav grundläggande kunskaper, konkreta verktyg och exempel på hur man kan integrera AI inom materialforskning. Konferensens presentationer fokuserade på AI för att optimera materialdesign, förutspå egenskaper samt förbättra analysmetoder. Tidigare har utvecklingen främst varit experimentell men nu kan man med hjälp av datorkraft prediktera, med hög sannolikhet, för att därefter verifiera detta experimentellt. Det här moderna angreppssättet kan förmodligen även användas för att ta fram nya signaturmaterial med önskade spektrala egenskaper som kan användas inom signaturanpassning.

Temat för 2025 års konferens var *Bioinspired materials* ett spännande forskningsområde som tar inspiration ifrån naturen för att utveckla nya material med förbättrade eller unika egenskaper. Konferensen handlade om ämnen som robotik, sensorer, antimikrobiella material, komplexa hierarkiska strukturer, biokemiska tillämpningar, design-principer, hållbarhet och miljövänliga lösningar.

### 2.1.3 WWSC International Conference 2025

Medarbetare från FOI deltog på den internationella konferensen WWSC 2025<sup>4</sup> (*Wallenberg Wood Science Center*) på KTH i Stockholm. Konferensen täcker aktuell forskning kring material från träindustrin så som cellulosa, hemicellulosa och lignin. Stora ekonomiska medel satsas på att stärka forskning kopplat till lignin som är en outnyttjad restprodukt från papperstillverkning världen över. Att utnyttja träbaserade material för att ersätta fossila motsvarigheter är en utmaning som skulle hjälpa industrin att ställa om till att bli mer hållbar och miljövänlig jämfört med idag. Flera föredrag och postrar på konferensen innehöll forskning som skulle kunna vara relevant för applikationer inom försvaret.

### 2.1.4 Wallenberg Initiative for Materials Science for Sustainability (WISE)

*Wallenberg Initiative for Materials Science for Sustainability* (WISE) är en strategisk satsning inom hållbara material som Knut och Alice Wallenberg Stiftelse (KAW) står bakom. Det handlar om många projekt som kan vara av intresse för signaturmaterial, t.ex. selektiva solabsorberande material, organisk elektronik, termofotovoltaiska material, additiv tillverkning av lättviktsstrukturer, 2D-material, metallorganiska ramverksmaterial, kompositmaterial, multifunktionella material, termoelektriska material, magnetiska nanokompositer och grafenkompositer. Även KAW-initierade samarbetet mellan *Wallenberg AI, Autonomous Systems and Software Program* (WASP) och WISE är intressant att följa, t.ex. komplexa strukturerade material. Medarbetare ifrån FOI deltog i WISE nätverksträff våren 2025. Intresse för samverkan finns på flera håll.

### 2.1.5 Innovative Materials Arena (IMA)

*Innovative Materials Arena* (IMA)<sup>5</sup> är ett innovationskluster som bidrar till ett nätverkande mellan akademi, forskningsinstitut och näringsliv i Östergötland, centrerat till Linköping och Linköpings universitet med särskilt fokus på avancerade material. Medarbetare ifrån FOI har deltagit vid diverse sammankomster.

### 2.1.6 ISIP - International Symposium for Indirect Protection Systems

ISIP, *International Symposium for Indirect Protection Systems*, är ett återkommande symposium av direkt relevans för FoT Signaturmaterial och brukar bevakas. Senast hölls det 2023 i Bad Reichenhall, Tyskland och FoT Signaturmaterial deltog för att bevakas.

### 2.1.7 SPIE Security + Defence

SPIE Security + Defence<sup>6</sup> är en årlig internationell konferens som FOI brukar bevakas, även FoT Signaturmaterial. Ofta bidrar FoT Signaturmaterial även med konferensbidrag, se avsnitt 8.2.

<sup>4</sup> <https://conference2025.wwsc.se/> Hämtad 2025-08-20.

<sup>5</sup> <https://innovativematerials.se/> Hämtad 2025-09-23.

<sup>6</sup> <https://spie.org/conferences-and-exhibitions/sensors-and-imaging/programme/conferences/security--defence> Hämtad 2025-09-23.

### 2.1.8 Temadag: kvantberäkningar för försvarstillämpningar

I samband med att FOI gör en kartläggning av kvantteknologiområdet för försvars och säkerhetstillämpningar. FOI har under 2025 inlett ett samarbete med Chalmers Tekniska Högskola. En temadag för att sprida kunskapen om arbetet genomfördes hösten 2025. FoT Signaturmaterial bevakade temadagen.

Kvantdatorer bedöms kunna erbjuda stor fördel i närtid inom simuleringar av bl.a. atomstrukturer, kemiska reaktioner och nya material. Kvantdatorer är särskilt bra på att simulera kvantsystem eftersom samma principer används som styr de system som modelleras, dvs. superposition och sammanflätning. Det medför att fysikaliska fenomen kan simuleras, något som klassiska datorer har svårt att hantera. Kvantdatorer kan även ge nya typer av maskininlärningsmodeller som t.ex. quantum neural networks.

## 2.2 Nationell omvärldsbevakning inom akademi och institut

Det här avsnittet beskriver nationell omvärldsbevakning av ett urval av ämnen och forskningsinfrastruktur som är intressanta för FoT Signaturmaterial.

### 2.2.1 Biobaserade material

Biobaserade material är ett stort forskningsområde i Sverige där *Wallenberg Wood Science Center* (WWSC) sticker ut som en stor satsning och är ett samarbete mellan KTH, Chalmers, Linköpings universitet, Stockholms universitet, Luleå tekniska universitet och Umeå universitet. Bland annat pågår forskning om nanocellulosa [6], aerogeler [6,7], lignin [8,9], transparent trä [10], elektriskt ledande cellulosa [11,12], hemicellulosa [13], biokompositer [14,15] och hållbara material för värmeisolering [16–18].

### 2.2.2 2D-material

2D-material är fortsatt ett intressant område på grund av deras unika materialegenskaper som kan komma till användning inom signaturanpassning. Sverige är i framkant, bl.a. med guldén som är ett 2D-material av guld som framställdes av avdelningen för tunnfilmfysik vid LiU [19] där man även bedriver forskning om MAX-faser [20] och MXener [21].

### 2.2.3 Metamaterial

Bio-Opto-Nano fysik KTH är aktiva inom området metamaterial och bedriver forskning om metaytor och hur materialegenskaperna påverkas såsom t ex antirefektivitet [22], UV-skydd [23], hydrofobicitet [24] och strukturell färgning [25,26]. Man har även studerat löv med intressanta fysiska-kemiska egenskaper [27–29].

### 2.2.4 Smarta material

Avdelningen för fasta tillståndets fysik vid Uppsala universitet är aktiva inom området smarta material, bl.a. termokromism [30], fotokromism [31], elektrokromism [32], gas-sensorer [33], fotokatalysatorer [34], men även passiva material med andra intressanta tillämpningar för signaturmaterial, t.ex. lågemissiva material med hög transparens [35].

Forskningsområdet materialvetenskap vid Umeå universitet forskar om organisk elektronik och fotonik, t.ex. ljusemitterande elektrokemiska celler [36], men även om nanomaterial för energitillämpningar, t.ex. optiskt selektiva ytor [37] och antireflekta ytor [38,39] genom en självordnande sol-gel-baserad process.

RISE Printed Electronics Arena och Laboratoriet för Organisk Elektronik (LOE) vid Linköpings universitet är aktörer som är aktiva inom området smarta material bl.a. inom elektrokromism [40], flexibel elektronik [41,42].

### 2.2.5 Termoelektriska material

Termoelektriska material har under de senaste femton åren blivit ett alltmer intressant alternativ att återvinna spillvärme till elektricitet. I Sverige finns det flera forskargrupper som studerar och utvecklar termoelektriska material; Uppsala universitet [43], KTH [44], Lunds universitet [45], Linköpings universitet [46] och Umeå universitet [47,48].

### 2.2.6 Mikrofluidik

Högskolan Väst har ett pågående projekt (AM-ACTS<sup>7</sup>) som handlar om additiv tillverkning av aktivt kylda termiska skyddssystem. Traditionella termiska skyddssystem förlitar sig vanligtvis på passiv kylning medan det här projektet syftar till att utveckla aktiv kylning genom att cirkulera en lämplig vätska med s.k. mikrofluidik teknik.

Molekylär termisk energilagring ifrån solen är ytterligare område som kan kombineras med mikrofluidik. En forskargrupp på Chalmers har sedan flera år tillbaka undersökt molekylär termisk energilagring som senare kan släppa ifrån sig värme [49].

### 2.2.7 Termisk energilagring

Solenergi kan lagras i organiska molekyler genom fotoomvandling där energin lagras som kemisk energi för att sedan triggas till att avge energin när den behövs i form av värme [49]. Området har en teoretisk energilagringspotential på 20,5% men har än så länge inte nått kommersiell potential. Det är dock ett forskningsområde som fortfarande utvecklas och kan kombineras i hybridlösningar med annan solenergiteknologi [50]. I Sverige forskar man på detta vid Chalmers tekniska högskola där man nyligen påvisat en rekordhög solenergilagringseffektivitet på 2,3% tillsammans med en solcell där hybridssystemet har en total verkningsgrad på 14,9% [51].

### 2.2.8 National Spark Plasma Sintering Facility

Vid Stockholms universitet finns en nationell forskningsinfrastruktur kring *Spark Plasma Sintering* (SPS), på svenska gnistplasmasintring. SPS är en snabb metod för sintring av keramer, metaller, legeringar, kompositer och porösa material i vakuum eller inert atmosfär. Det finns möjlighet att både sintra mindre eller större dimensioner samt även hantera luftkänsliga material.

### 2.2.9 Myfab

Myfab (*the Swedish Research Infrastructure for Micro and Nano Fabrication*) är en svensk forskningsinfrastruktur som finns i Kista (drivs av KTH/RISE), Uppsala (drivs av Uppsala universitet), Göteborg (drivs av Chalmers) och Lund (drivs av Lunds universitet). Myfab erbjuder högkvalitativa renrumsmiljöer för mikro- och nanoteknik vilket är av intresse för tillverkning av t.ex. metamaterial.

### 2.2.10 MAX IV

MAX IV<sup>8</sup> är ett svenskt nationellt forskningslaboratorium för acceleratorfysik och forskning med synkrotronstrålning. MAX IV är världens första synkrotronkälla i den fjärde generationen och är tillgängligt för användare över hela världen. MAX IV erbjuder 16 olika strålrör som är inriktade på olika avancerade tekniker för att studera material genom modern röntgenspektroskopi, röntgendiffraction/röntgenspridning och imaging (avbildning). Nyttan med dessa avancerade tekniker är att skapa en djupare förståelse för material, t.ex. samband mellan egenskaper och struktur.

<sup>7</sup> <https://www.hv.se/forskning/forskningsprojekt/primus-forskningsprojekt/am-acts/> Hämtad 2025-09-23.

<sup>8</sup> <https://www.maxiv.lu.se/> Hämtad 2025-05-27.

### 2.2.11 New quantities for the measurement of appearance (BxDiff)

RISE deltog i EU-projektet BxDiff *New quantities for the measurement of appearance*<sup>9</sup> inom forskningsprogrammet *European Metrology Programme for Innovation and Research* (EMPIR) som är integrerat i Horizon 2020 och som The European Association of National Metrology Institutes (EURAMET) ligger bakom. Projektet BxDiff löpte under 2019–2022 och är ett Joint Research Project och handlade bl.a. om BTDF (*Bidirectional Transmittance Distribution Function*), BRDF (*Bidirectional reflectance distribution function*) samt BSSRDF (*Bidirectional scattering surface reflectance distribution function*) för att definiera kvalitetssäkrade mätmetoder för karakterisering av material och ytor.

### 2.2.12 Metrological framework for passive radiative cooling technologies (PaRaMetriC)

RISE deltar i EU-projektet PaRaMetriC<sup>10</sup> *Metrological framework for passive radiative cooling technologies* som är finansierat av *European Partnership on Metrology*, medfinansierat av Horizon Europe. Projektet löper under 2022–2025 och syftar till att definiera pålitliga test- och mätmetoder för att utvärdera den passiva kylförmågan samt karakterisera emissivitets- och reflektansegenskaper hos tunnfilmer i ett brett våglängdsområde. Det ingår även att utveckla och validera modeller för prestationen av material för passiv kylning.

## 2.3 Internationell omvärldsbevakning

En generell internationell omvärldsbevakning genomförs kontinuerligt med syfte dels att följa forskningsfronten inom material som skulle kunna användas för signaturanpassning men också trender i signaturanpassningsmaterial. Vi redogör nedan om observationer av tekniker baserat på exempel på vetenskaplig litteratur de senaste 15 åren inom kamouflagematerial.

- Termoelektriska material kombinerat med naturliga material [52].
- Elektrokroma material för styrbar signaturanpassning [53–55] [56–59]
- Termokroma material [60,61]
- Fasomvandlingsmaterial [59,62–65]
- Metaytor/material [56,62,66–81]
- Bioinspirerade material [62,74,78,82–88]
- Mikrofluidik [89]
- Multispektral design [59,60,80,81,87,90–95]
- Adaptivt IR-kamouflage [60,61,71,96–101]
- Mesoporösa material [94,102,103]
- Nanokomposit [104]
- 2D-material [56,75,91,99,100,105]
- Passiv kylning [66,77,79,92,93]
- Modellering för utvärdering [95,106]
- Flytande kristaller [56]

Observationer man kan göra är att multispektral signaturanpassning är ett tydligt behov och att metaytor/material samt bioinspirerade material är intressanta forskningsområden. Ofta behöver olika materialtekniker samverka för att uppnå multispektral signaturanpassning och dessutom kan olika tekniker lämpa sig för olika ändamål. Adaptiva eller smarta material (innefattar elektrokroma, termokroma och fasomvandlingsmaterial) är också en tydlig materialtrend, framförallt för signaturanpassning i IR som är mer utmanande än i UV och i VIS. 2D-material har intressanta egenskaper som kan kombineras med andra tekniker. Passiv kylning är ett forskningsämne som har undersökts alltmer de senare åren p.g.a.

<sup>9</sup> <https://bxdiff.cmi.gov.cz/> Hämtad 2025-09-23.

<sup>10</sup> <https://parametric.inrim.it/> Hämtad 2025-09-23.

fördelar gentemot lågemissiva ytor som ofta är väldigt reflekterande i IR. Andra observationer är att mikrofluidik, flytande kristaller, mesoporösa material och termoelektriska material också utreds som signaturmaterial till viss del. Sammanfattningsvis är samtliga observerade tekniker något som FOI har eller har haft under uppsikt. Inom flertalet tekniker bedriver FOI dessutom aktiv forskning i antingen egen regi eller i samarbete främst med akademien.

### **2.3.1 The Innovative Advanced Materials Initiative (IAM-I)**

*The Innovative Advanced Materials Initiative (IAM-I)*<sup>11</sup> är icke en vinstdrivande organisation med syfte att kraftsamla för ett multidisciplinärt samverkande inom Europa för forskning och innovation inom hållbara innovativa avancerade material. IAM-I samlar alla typer av intressenter från utvecklare till användare och övriga intressenter som ingår i värdekedjan. Målet är bl.a. att samla och uppdatera en forsknings och innovationsagenda inom material och skapa ett nav för nätverkande. Sverige finns representerade i IAM-I. IAM-I driver bl.a. det EU-finansierade initiativet IAM4EU. IAM4Sweden är ett nationellt initiativ och instrument för att möjliggöra nationell samordning.

---

<sup>11</sup> <https://www.iam-i.eu/> Hämtad 2025-09-23.

### 3 Slutsatser och rekommendationer till Försvarsmakten

FoT-projektet Signaturmaterial har pågått under tidsperioden 2023–2025. Arbetet utförts genom litteraturstudier, samarbeten, experimentella studier inom utvalda områden och besök vid utvalda vetenskapliga konferenser etc. med syfte att följa och bedriva forskning och utveckling av nya material med potential för försvarstillämpningar inom signaturanpassning.

Frågeställningarna som projektet har haft som utgångspunkt beskrivs nedan.

- Vilken utveckling inom civil materialvetenskap bedöms användbar för att förbättra signaturanpassning?
- Hur bör signaturmaterial designas för att vara effektiva, funktionella och framtidssäkrade?

Frågeställningarna bedöms fortsatt vara aktuella, dock med en notering om att nu satsas forskningsfinansiering även på material för militär tillämpning. Därav är det inte endast intressant att bevaka civil materialvetenskap utan materialvetenskap i en generell bemärkelse. Metoderna för att besvara frågeställningarna; omvärldsbevakning, materialvetenskaplig kompetensutveckling, mätning och modellering är fortsatt relevanta. Omvärldsbevakningen har gett information om att det är viktigt att kunna bedöma och verifiera materialegenskaper. Det är en kompetens som är efterfrågad och som FOI är duktiga på men fortsatt kompetensutveckling behövs. Även andra egenskaper än specifikt signaturegenskaper är nödvändiga att beakta och därav behövs kompetensutveckling även bedrivs bredare. Modellering och simulering är viktiga verktyg, för att kunna effektivt förstå och utveckla framtidens signaturmaterial. Det är ett kompetensområde Signaturmaterial behöver bygga kompetens inom.

Utifrån slutsatser för tidsperioden 2023–2025 rekommenderas primärt att FoT Signaturmaterial bygger kompetens inom modellering och simulering inkl. artificiell intelligens och maskininlärning av materialegenskaper/parametrar för signaturanpassning. Sekundärt rekommenderas även kompetensuppbyggnad inom mätmetodik, additiv tillverkning av signaturmaterial, biologiskt nedbrytbara material för skenmål och styrbara signaturmaterial, vilket avses främst genomföras genom förvaltning av åtaganden i pågående samarbeten och i samverkan med andra FoT-projekt.

Utöver det bör specifika forskargrupper identifieras som är ledande inom de utvalda områdena och samarbeten konkretiseras för att på så vis effektivare bygga kompetens.

För den andra frågeställningen rekommenderas att man specifikt ser över hur ett signaturmaterial bedöms vara lämpligt. Går det att använda och sammanväga enkla mått, genom mätning/beräkning/modellering, för att jämföra olika signaturmaterial för olika tillämpningar? Det rekommenderas att genomföras i dialog med Försvarsmakten.

För att kunna användas måste signaturmaterial generellt sett uppfylla samtliga tre perspektiv för militär nytta: militärt effektivitet, militärt lämplighet och ekonomisk överkomlighet för en specifik användare och en specifik kontext [107].

Mått på användbarhet och lämplighet är emellertid bortanför signaturmaterials TRL<sup>12</sup> (*Technology Readiness Level*) om det inte exempelvis sker genom riktad samverkan med t.ex. FoT-projekt Signaturåtgärder. Behovet av kännedom om den kontext i vilken signaturreduktion används och om sensor-hotutvecklingen är relevant. När det gäller framtidssäkring finns ytterligare två perspektiv att ta hänsyn till. Det ena är att de signaturmaterial som används inte bidrar till att förstöra eller missgynna ömtålig natur, t.ex. genom gruvdrift eller genom att öka CO<sub>2</sub> utsläpp, det kan definieras som hållbarhet. Det andra är att producenter som tillgodoser att produkter finns är dedikerade och producenter

<sup>12</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Technology\\_readiness\\_level](https://en.wikipedia.org/wiki/Technology_readiness_level) Hämtad 2025-10-13.

kan leverera i en behovssituation utan att konkurrera med andra åtaganden, det kan definieras som tillgänglighet och ekonomisk överkomlighet.

En hjälp till Försvarmakten och FMV kan även vara att kartlägga tillgången på material som är lämpliga för signaturmaterial inom Europa, identifiera kompetens som saknas i Sverige för att därefter bygga upp den kompetensen i samverkan med relevanta aktörer. Vidare bör man identifiera och skapa nätverk för signaturintresserade personer för att samla kompetens både internt inom FOI och externt (ett exempel är SAMSAT, en samverkansgrupp för signaturanpassning, som är initierat av FMV).

## 4 Mätteknik och metodutveckling

Mätteknik och metodutveckling behövs för att kunna värdera materialegenskaper och förstå om gamla material fortfarande är funktionella. Nya material och nya sensorer för med sig ett behov av metodutveckling. Det görs ibland inom institutet och ibland i samverkan med andra. Nedan följer exempel på mätteknik och metodutveckling.

### 4.1 Elektrooptiska spektrala mätningar

För karakterisering av materialytor och beläggningar för signaturanpassning inom det elektrooptiska våglängdsområdet har vi bl.a. tillgång till spektrometrar och utrustning för att mäta ljusspridning från ytor, s.k. BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*, eller *Fördelningsfunktionen för bistatisk reflektion*). Spektrometrar och metodik finns utförligt beskrivna [108,109]. Genom den typen av mätningar kan vi i labb bedöma hur reflektansegenskaperna hos olika material och ytbeläggningar förhåller sig till diverse naturbakgrunders egenskaper inom olika våglängdsområden. Elektrooptiska hotsensorer som vi här måste beakta har känslighet inom olika spektrala våglängdsband, såsom UV, VIS, NIR, SWIR, MWIR och LWIR, och kommer att uppfatta kontrasten mellan en tillverkad yta och dess bakgrund olika beroende på vilket våglängdsband man tittar inom. Därför måste vi ha förmågan att bedöma olika ytors spektrala reflektansegenskaper inom dessa våglängdsband. Ljusspridning eller BRDF från en yta ger oss viktig information om signaturens rikttningsberoende. Både spektral reflektans och BRDF är dessutom viktiga indata för realistisk signaturmodellering av objekt i olika omgivningstyper.

Vi har tillgång till två olika spektrometrar, Cary 5000 och Bruker FTIR V70, för att täcka in hela spektralområdet för elektrooptiska sensorer, inom UV-VIS-NIR-SWIR respektive SWIR-MWIR-LWIR. Dessa är utrustade med integrerande sfärer för att kunna mäta diffus och spekulär reflektans från ytor, s.k. DHR (Directional Hemispherical Reflectance), dessutom vid olika vinklar av ljusinfall mot ytor.

För att även kunna mäta på ytor som inte kan mätas inomhus i labb har vi ett antal handhållna spektrometrar för fältmättningsbruk. Sedan tidigare har vi tillgång till två handhållna spektrometrar, SOC 410 Solar och IR, med känslighet inom 6 och 7 olika våglängdsband för IR (0,9–12,0  $\mu\text{m}$ ) respektive VIS (335–2500 nm). För att få tillgång till data med högre spektral upplösning har vi nyligen köpt in två andra fältanpassade spektrometrar: en ASD FieldSpec 4 Hi-Res NG med känslighet inom 350–2500 nm med spektralupplösning 3–6 nm, samt en Agilent FTIR 4300 för våglängdsområdet 2–15  $\mu\text{m}$  med spektral upplösning 4–16  $\text{cm}^{-1}$ .

#### 4.1.1 Spridningsmätningar

Beträffande BRDF-mätningar har vi tillgång till instrumentet TASC Polarimetric Scatterometer från The Scatter Works, Inc. Instrumentet kan mäta ljusspridning över hela hemisfären över en provyta med låg brusnivå, hög dynamik och mycket hög vinkelupplösning. Instrumentet kan utrustas med olika våglängder av laserljuskällor eller bredbandiga ljuskällor med passande detektorer. För närvarande har vi tillgång till laserljuskällor vid våglängderna 633 nm, 853 nm, 1550 nm, 3,39  $\mu\text{m}$  och 9,5  $\mu\text{m}$ . Vi planerar även att komplettera med våglängden ca 4  $\mu\text{m}$ , då våglängden 3,39  $\mu\text{m}$  precis ligger i ett kolväte-relaterat absorptionsband som kan påverka mätning av färgskikt. En nyligen införskaffad InGaAs-detektor ska ge bättre känslighet vid mätningar inom SWIR (1550 nm) och för 9,5  $\mu\text{m}$  väntar vi på en ny MCT-detektor (*Mercury Cadmium Telluride*). I framtiden är vi även intresserade av att införskaffa en bredbandig visuell ljuskälla för att spektralt kunna täcka hela visuella området i stället för en begränsad del, vid 633 nm. Det görs en ansats att kunna göra BRDF-liknande mätningar utomhus. Det är dock viktigt för att kunna

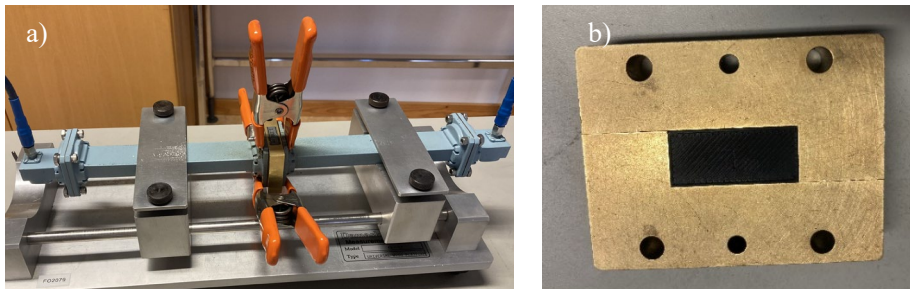
jämföra BRDF-mätningar utomhus med mer noggranna mätningar utförda med labbinstrument, se beskrivning av examensarbete <sup>13</sup>.

## 4.2 Radar mätningar

Elektriska och magnetiska egenskaper hos material som används till radartillämpningar behöver karakteriseras för att ge förståelse om materialet och ge indata till modellering. För nämnda materialkarakterisering krävs utrustning och mätupställningar som beskrivs kortfattat i följande avsnitt.

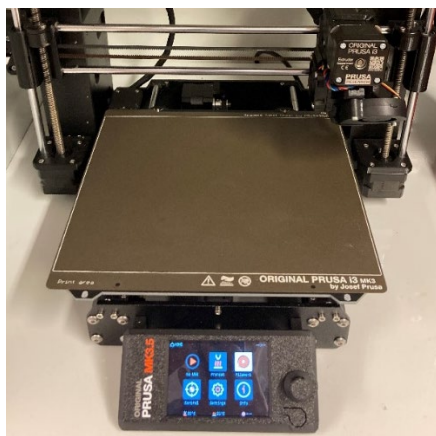
### 4.2.1 Mätning med vågledare

Grundläggande elektriska och magnetiska egenskaper undersöks med hjälp av en vågledare och en nätverksanalysator (VNA, *vector network analyzer*). En vågledare kan användas för att leda mikrovågor, se Figur 1, som ska interagera med ett materialprov. Den vanligaste modellen består av ett ihåligt rektangulärt metallrör som kan rikta energin mot ett materialprov. En metod för att mäta elektrisk permittivitet ( $\epsilon$ ) och magnetisk permeabilitet ( $\mu$ ) hos ett material är att placera en provbit av materialet i en vågledare och mäta dess reflektion och transmission av mikrovågor vid olika frekvenser. Utifrån mätresultaten och en matematisk modell kan permittivitet och permeabilitet beräknas för materialet.



Figur 1. a) Mätutrustning, vågledare och provhållare i mässing placerad mellan två antenner, b) prov i provhållare till vågledaren.

En viktig aspekt vid vågledarmätningar är att proverna ska vara rätt dimensionerade och ha god passform i provhållaren, se Figur 1b. Prover till vågledaren kan skrivas ut med hjälp av en 3D-skrivare, se Figur 2, men leder tyvärr ofta till mindre bra passform. En begränsning med 3D-skrivare är att endast material som är lämpliga för tekniken kan användas och matrismaterial påverkar resultatet ifrån vågledarmätningar.

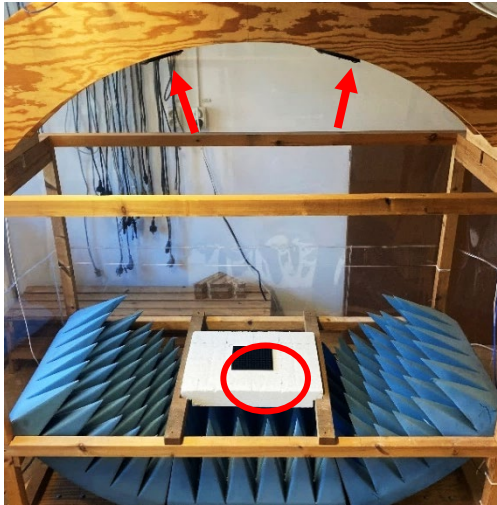


Figur 2. Exempel på en vanlig 3D-skrivare, som kan användas vid utskrift av materialprover

<sup>13</sup> L Serrander, Methodology for BRDF Measurements in Outdoor Conditions with Solar Illumination, MSc. Thesis, ISRN: LITH-IFM-A-EX--25/4720--SE

#### 4.2.2 Mätning med NRL-båge

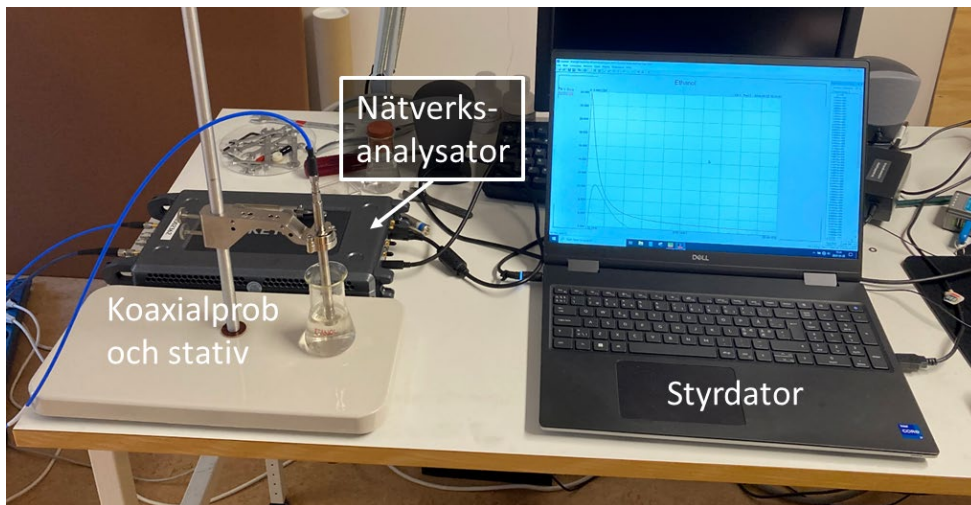
Reflektion av strålning i relevanta radarfrekvenser mäts genom att använda ett mätverktyg som kallas *Navy Research Laboratory*-båge (NRL-båge), se Figur 3. Med denna utrustning mäter man reflekterad strålning som infaller mot en yta där provet kan vara en plan panel, t.ex. i storleken 15x15 cm<sup>2</sup> eller 30x30 cm<sup>2</sup>. Resultaten kan ge information om ytans förmåga att absorbera radarstrålning. Uppställningen består av en träställning med sändar- och mottagarantennerna i en viss vinkel relativt provet och en nätverksanalysator med tillhörande mjukvara. Avståndet mellan antennen och ytan är ca en meter. Utrustningen kan utföra vektoriella mätningar i området 2 till 40 GHz med amplitud och fasinformation. Skalära mätningar (amplitud) kan även göras inom frekvenserna 2 till 120 GHz. Metoden producerar relativa mätningar där man kalibrerar mot en metallyta i samma storlek som sitt prov, vilket ger ett referensvärde som subtraheras ifrån efterföljande mätningar. Resultaten anges i enheten decibel (dB).



Figur 3. Mätupställning för NRL-båge med antenner, prov och blåfärgat absorbermaterial.

#### 4.2.3 Utrustning för mätning av mikrovågsegenskaper hos vätskor och pulver

En utrustning för mätning av elektrisk permittivitet i mikrovågsområdet hos vätskor och pulver köptes in under 2024. Utrustningen består av en Keysight *performance probe*, hållare, kalibreringskit samt tillhörande mjukvara Keysight N1500A option 004. Utrustningen visas i Figur 4.

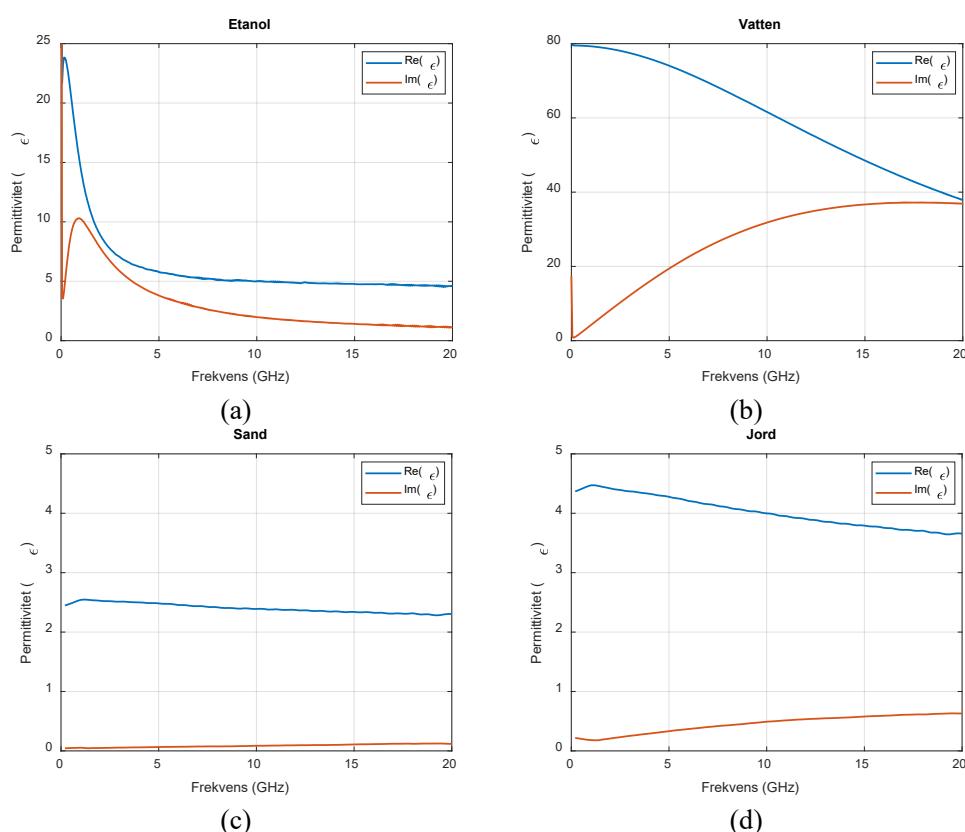


Figur 4. Inköpt mätutrustning för mikrovågsegenskaper hos vätskor och pulver.

Utrustningen är avsedd för vätskor, pulver och konforma material, dvs. material som helt omsluter änden på mätproben, t.ex. geler, pastor och andra formbara material. Utrustningen har kapacitet att mäta komplex relativ permittivitet mycket bredbandigt, från 10 MHz till 50 GHz (med nätverksanalysatorn i Figur 4 är det möjligt att mäta upp till 20 GHz). Mätningarna är snabba och tar mindre än en minut per prov efter kalibrering. Utrustningen är ett användbart komplement till befintlig mätutrustning som används för fasta material och utförs i vågledare.

En tillämpning för resultaten från mätutrustningen är karakterisering av markmaterial (grus, sand, jord, mm) för arbete med markpenetrerande radar. En annan tillämpning är analys av styrbara och adaptiva signaturmaterial som innehåller flytande eller mjuka komponentmaterial. En begränsning är att det inte är möjligt att mäta magnetisk permeabilitet.

Utrustningen levererades i början av 2025. Några testmätningar på vätskor och markmaterial har utförts (avjonat vatten, etanol, sand och jord). Resultaten illustreras i Figur 5.



Figur 5. Uppmätt relativ permittivitet för (a) etanol, (b) avjonat vatten, (c) sand och (d) jord. Mätningarna utförda av Jan Fagerström (a & b) respektive Fredrik Lund (c & d).

### 4.3 Kemilabb

Vid FOI i Linköping finns sedan många år tillbaka ett kemilabb. Att ha en kemiverksamhet ställer krav på goda rutiner, arbetssätt och kunskap om kemiska riskkällor för att undvika olyckor och tillbud. Inom projektet har man uppdaterat rutiner vad gäller arbetssätt och säkerhet i kemilabbet samt även utfört mindre underhåll.

### 4.4 Kulkvarn

En kulkvarn har köpts in för malning av olika typer av material. Kvarnar används inom flertalet industrier t.ex.

- Gruvning, där man maler malm till mindre partikelstorlekar för att kunna mäta på innehållet och kontrollera kvaliteten,
- Läkemedelsindustri, för malning till finare pulver för kontroll.
- Byggnadsmaterial, exempelvis för kontroll av gammal isolering så att den inte innehåller asbest.
- Forskning för att tillverka mikro- eller nanopartiklar.

Det finns olika kvarnar beroende på tillämpning. En av de mest versatila kvarnarna är en kulkvarn (*Ball mill*). FoT-projektet Signaturmaterial har varit med och bekostat en MM500 Control från Retsch, se Figur 6.

För att mala på rätt sätt krävs kunskap inom metodik för malning. Malkulor som är större än det material man vill mala läggs tillsammans med materialet i malbägaren (malbägare och malkulor ska bestå av samma material). Malbägaren låses fast i kulkvarnen och vibrationsfrekvens samt tid för malning ställs in. Friktionen som skapas inne i bägaren när kulorna slår sönder materialet i mindre bitar. Den energi som frigörs gör att allt i bägaren värms upp, vilket kan sätta igång kemiska reaktioner. Därför finns även möjlighet att kyla bägaren underifrån via en platta. Med det tillbehör som finns kan bägaren kylas ned till  $-40^{\circ}\text{C}$ . En nedkylningsperiod innan malning kan behövas för att kylan ska sprida sig inom bägaren.



Figur 6. Kulkvarnen MM500 Control från Retsch.

Materialet man vill mala bör inte vara hårdare än materialet som bägaren och kulorna består av, annars kan kontamination av materialet uppstå. För att uppnå mikro- eller nanostorlek på materialet kan man behöva mala i flera omgångar genom att börja mala med stora malkulor, för att därefter stegvis gå ned i storlek på malkulorna. Malning kan ske i torrt eller vått tillstånd. Vill man mala ett material till  $<30\mu\text{m}$  måste man våtmala. Vatten, alkohol eller buffertlösning tillsätts vilket hjälper till att neutralisera de elektrostatiska krafter som uppstår mellan små partiklar som gör att dem agglomererar.

För att mala ett material som är elastiskt, så som polymerer, plaster eller fibrer, måste materialet kylas under malning. Det riskerar annars hettas upp under malningen och kan smälta om man maler i rumstemperatur. Vissa material påverkas eller bryts ned av värme och för att behålla egenskaperna på dessa material krävs kylning.

Olika malparametrar utvärderas för att komma fram till vad som fungerar för det material man önskar mala och vilken storlek man är ute efter.

## 4.5 Värmeledning

Värmeledning och värmekapacitet kan mätas med differentiell svepkalorimetri (DSC, *Differential Scanning Calorimeter*). Fasövergångar i materialet kan också undersökas. Mätningen baseras på mängden energi som krävs för att ändra temperaturen i ett material i förhållande till en tom provhållare. Instrumentet kan stegvis kylas med flytande kväve till  $-160^{\circ}\text{C}$  eller värmas upp med elektriska element till  $600^{\circ}\text{C}$ . Mätresultatet, energi som en funktion av temperaturen, ger information om värmen som absorberas eller avges där toppar eller dalar motsvarar exotermiska eller endotermiska reaktioner i materialet. På så vis kan

fysikaliska egenskaper hos provet bestämmas, exempelvis kristallisationstemperatur och/eller glasövergångstemperatur.

Ett annat sätt att studera värmeledning är att använda en IR-kamera och något typ av värmeelement, exempelvis en värmeplatta. Det IR-kameran observerar är provets skenbara temperatur. Den skenbara temperaturen är kopplad till provets emissivitet. Ett prov med hög reflektans i IR-våglängder har en låg emissivitet (om transmissionen är 0) vilket får provet att se kallare ut än dess faktiska temperatur.

## 4.6 Artificiell Intelligens (AI)

De senaste åren har stora framsteg gjorts inom AI och materialvetenskap. Tre centrala forskningsområden har varit accelerationen av traditionella beräkningsmetoder, förbättringar av analysverktyg och användningen av AI för att designa material med specifika och önskade egenskaper. Användning av AI kräver annan kunskap än den konventionella materialvetenskapen.

### 4.6.1 Beräkningsmetoder och AI

Finita elementmetoden (FEM) [110,111] och täthetsfunktionalteori (DFT, *Density Functional Theory*) [112] används för att simulera materialegenskaper ifrån atomär till makroskopisk skala. Dessa metoder är dock mycket resurskrävande. AI kan avsevärt minska beräkningstiden och resursbehovet, vilket möjliggör betydligt snabbare experimenterande med nya material och simulering av deras egenskaper – något som tidigare varit praktiskt taget omöjligt.

### 4.6.2 Förbättrade analysmetoder

Den snabba utvecklingen av AI har lett till betydande förbättringar inom materialanalys, t.ex. snabbare och mer precisa spektroskopianalyser möjliggör effektiv karakterisering av materialens kemiska sammansättning eller struktur [113]. Inom mikroskopi har AI använts för att identifiera och klassificera mikrostrukturer, korngränser och textur i material har kunnat effektiviseras [114]. Användning av AI har även gett forskare möjlighet att upptäcka defekter som porositet, sprickor eller inneslutningar på ett mer systematiskt sätt [115].

### 4.6.3 Materialdesign med AI

AI-modeller som Googles GNoME [7] och Microsofts MatterGen [8] har revolutionerat utvecklingen av nya material. Dessa modeller tränas på stora datamängder och identifierar samband som är svåra eller omöjliga för människor att upptäcka. Modellerna kan sedan föreslå nya material med önskade egenskaper, t.ex. högre hållfasthet eller förbättrad elektrisk ledningsförmåga.

### 4.6.4 AI tillämpat mot signaturmaterial

Genom att tillämpa AI skapas nya möjligheter att utveckla material med specifika signaturer för militära ändamål. Här följer några exempel:

- Materialstrukturer kan utformas för att effektivt avleda värme, vilket kraftigt reducerar dess värmesignatur och försvårar upptäckt med termiska IR-kameror.
- Material med specifika spektrala signaturer kan utvecklas för att vilseleda sensorer och annan övervakningsutrustning.
- Radarabsorberande beläggningar och material med eftersökta egenskaper, elektrisk permittivitet och magnetisk permeabilitet, samt dess struktur kan också utvecklas.

## 5 Kunskapsuppbyggnad

I det här avsnittet rapporteras om kunskapsuppbyggnaden inom projektet i egen regi och i samverkan. Under projektet har även ett arbete med att sammanställa en signaturmaterialguide initierats för att underlätta en överblick inom området som är komplext. Inom FOI finns även samarbetsprojekt, bl.a. tillsammans med Avdelningen för Försvarsanalys. Några exempel på genomförda litteraturstudier är hydroorganogeler [116] och extremt värmetåliga material [117,118] samt en ännu inte avslutad om metallorganiska ramverksmaterial.

### 5.1 Material för spektral signaturanpassning

Det här avsnittet beskriver kunskapsuppbyggnad och forskningsaktiviteter inom spektral signaturanpassning vilket omfattar våglängdsområdena UV, VIS, NIR, SWIR, MWIR och LWIR.

#### 5.1.1 Bioinspirerade organiska material

En utmaning inom signaturanpassning ligger i våglängdsområdena NIR och SWIR. I dessa områden uppstår det i naturen specifika optiska egenskaper som behöver tas hänsyn till vid design av kamouflagematerial. Dessa egenskaper kommer från reflektansen av växter i NIR-området samt den stora andel vatten som finns i växter som leder till absorption av ljus i SWIR-området. Inom projektet har två laborativa studier om biologiska material som kan bidra till en förbättrad signatur utförts, de beskrivs kortfattat nedan.

En studie undersökte användandet av nanocellulosa för att skapa tunna filmer som efterliknar de optiska egenskaperna hos löv [119]. Cellulosa är en regenerativ råvara som är biologisk nedbrytbar och produceras i Sverige. Nanocellulosa agerade som en matris och tillsammans med olika additiv var det möjligt att skapa ett material som väl efterliknar de optiska NIR-egenskaperna som återfinns i naturen.

En annan studie, som utfördes som ett examensarbete<sup>14</sup>, undersökte hur vatten hålls kvar i olika textilier för att utvärdera SWIR-egenskaperna [120]. Även här användes nanocellulosa i kombination med textilierna men i syfte att undersöka om cellulosamatriken motverkar avdunstning av vatten från textilierna.

Biologiska material inom signaturanpassning handlar om att använda naturliga material och organiska system för att reducera signaturen. Cellulosa och nanocellulosa är bara två exempel av många biologiska material som har potential. Andra material inkluderar alger, växter/mossor och mycel för tillämpningar inom exempelvis textilier, nedbrytbara skenmål och levande kamouflagematerial.

#### 5.1.2 Lågmissiv färg

Ett effektivt sätt att minska signaturen för plattformar inom det termiska IR-området (TIR) och därmed minska risken för upptäckt med värmekameror, är att minska den skenbara temperaturen genom en minskning av ytans emissivitet. Detta kan t.ex. realiseras med en lågmissiv färg innehållande aluminiumflagor, som ökar färgskiktets reflektans inom TIR och därmed minskar emissiviteten. Nackdelen med metallflagor är dock att de ibland kan skapa en glittrig effekt på färgytan och att de med sin fysiska ytstorlek (ca 20  $\mu\text{m}$ ) döljer andra viktiga pigment för visuell signaturanpassning i färgen. Vi har visat att man kan ersätta aluminiumflagor med silvernanostrådar. Dessa har en diameter runt 100 nm och en längd från ca 1  $\mu\text{m}$  upp till 30  $\mu\text{m}$ . Med metalliska nanostrådar kan man utnyttja den s.k. ytplasmonresonansen eller antenneffekten, som för en viss längd i förhållande till ljusets

<sup>14</sup> E. Örtenberg, Optical properties of water absorbing textiles for camouflage, MSc. Thesis, ISRN: LITH-IFM-A-EX--22/4211—SE, 2023

våglängd skapar hög reflektans och därmed låg emissivitet. Speciellt inom LWIR (8–12  $\mu\text{m}$ ) har vi kunnat visa att den skenbara temperaturen kan sänkas med upp till 20°C från en yttemperatur av 50°C. Arbetet gjordes inom ramen av ett masterexamensarbete<sup>15</sup> och presenterades vid SPIE-konferensen Security+Defence i Amsterdam, 2023 [121].

Flera projekt har intresse för och samverkar i arbetet med lågemissiv färg. Inom detta projekt har kompetensöverföring skett genom en intern kurs, då principerna bakom tillverkning av lågemissiv färg, med aluminiumflagor eller silvernanostrådar som IR-reflekterande pigment demonstrerades. Övriga ingredienser är IR-transmitterande bindemedel och vissa tilläggsmedel samt även visuella pigment.

### 5.1.3 2D-material

Inom signaturmaterial diskuteras ofta tvådimensionella material (2D-material). Ett 2D-material är ett material som endast består av ett eller ett fåtal atomlager i tjocklek. 2D-material är mer än bara tunna material. När partiklar blir tillräckligt små (begränsade i alla tre rymddimensioner) behövs kvantmekanik för att beskriva deras egenskaper. 2D-material är tunna och därför begränsade i en av tre rymddimensioner. De har även en mycket hög area i förhållande till volym. På grund av detta har 2D-material mycket intressanta egenskaper för militära applikationer såsom multispektralt kamouflage, sensorer och elektronik. FOI har bevakat och bedrivit arbete inom framförallt grafen, se [122–124]. Nya 2D-material tillverkas och beskrivs ständigt. Dessa material behöver avsökas och noteras. Ett exempel är framställningen av 2D-guld (s.k. guldén) som publicerades 2024 [19].

Baserat på en tidigare färdplan [125] ser vi vägen framåt de kommande 2 åren sammanfattat i Tabell 1.

Tabell 1: Sammanfattning av färdplanen inom 2D-material för optisk signaturanpassning.

Grafen	Fortsätt studera grafen experimentellt som signaturmaterial med samarbetspartner inom lämpligt signaturmaterialrelaterat projekt (TRL2-5)
MXene	Genomför en kort studie på MXene som signaturmaterial utifrån resultat från föregående år. Studien kan genomföras som t.ex. examensarbete på masternivå
hBN	Avvakta
Fosforen	Avvakta
TMD <sup>16</sup>	Genomför en litteraturstudie för att se hur TMD:er utvecklats som signaturmaterial
2D-material generellt	Genomför en avskanning för att hitta nya 2D-material inom signaturområdet. Detta skulle kunna innefatta exempelvis guldén och 2D-MOF (metall-organiska ramverk)

### 5.1.4 Smarta material

FOI har via deltagande i ACAMSII, ett EU-finansierat projekt inom *Preparatory Action for Defence Research* (PADR) programmet, jobbat med adaptivt kamouflage för soldater. En soldat kan behöva röra sig i olika miljöer och är i modern stridsföring mer exponerad genom drönare som kan användas för observation. Idealt bör soldaten ha en låg kontrast mot bakgrunden i både det visuella och infraröda våglängdsområdet i olika miljöer. Idealbilden kan hämta inspiration ifrån t.ex. kameleonten [126] eller bläckfisken [127] och deras förmåga till anpassning mot bakgrunden. Det finns flera möjligheter för adaptiva material för kamouflage-tillämpningar, varav flertalet är utvecklade för civila tillämpningar [128].

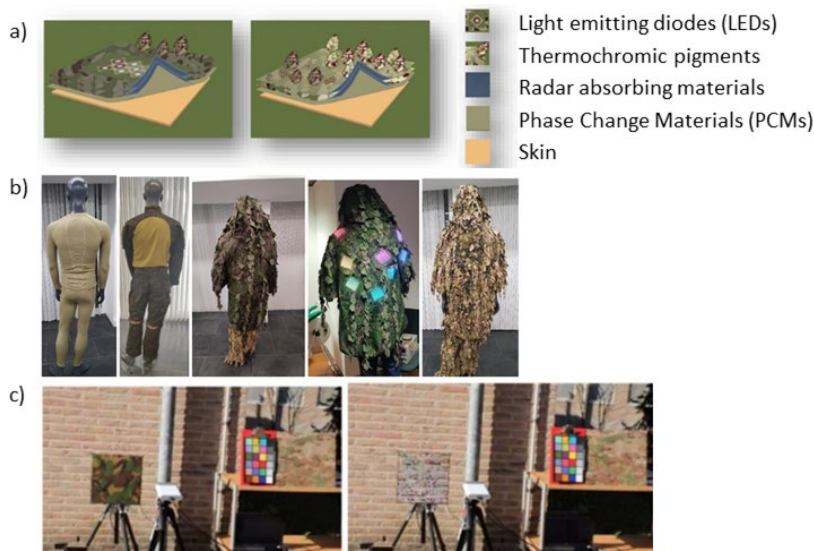
- *Organic Light Emitting Diodes* (O)LED
- Peltier-element som via den termoelektriska effekten antingen kan värma eller kyla ytor.

<sup>15</sup> M. Håkansson, Optical studies of silver nanowires as IR-Reflective Pigments in low-emissive paint, Linköping University, Dept. of Physics, Chemistry and Biology, Master's thesis, 30 ECTS, Physics, Spring term 2023, LiTH-IFM-A-EX--23/4234--SE.

<sup>16</sup> TMD: Transition metal dichalcogenides monolayers

- Kromogena material
- Elektroforetiska displayer
- Biomimetik
- Fasomvandlade material
- Metamaterial.

Idéer som kom fram under ACAMSII demonstrerades i Paris 2022 [129], se Figur 7. Det har sedan lett till nya europeiska samarbetsprojekt, ACROSS<sup>17</sup> (2023–2027) och ASCALS<sup>18</sup> (2023–2024). Mer om dessa under avsnitt 7.2.



Figur 7: Koncept för adaptivt kamouflage för soldater som utvecklades under ACAMSII där a) beskriver integration av olika teknologier i olika lager, b) visar de olika lagren på en docka där foto 4 (från vänster) visar när LED-matriser lyser och c) visar en demonstration av det adaptiva kamouflaget ifrån ursprungsläget till anpassningen till en tegelvägg.

### 5.1.5 Självordnande material

Tillsammans med universitetet i Minho (Portugal) och Linköpings universitet har vi studerat självorganiserande material och hur de kan frambringa iridescenta eller regnbågsskimrande färger för olika textila ytor [130]. Detta som ett alternativ till kemisk färgning av textilier som bl.a. orsakar stora problem med föroreningar av vatten. Sfäriska partiklar av Poly(styren-metyl metakrylat-akrylsyra) med fem olika storlekar inom 170–250 nm belades på obehandlade textilier av polyamid, polyester och bomull. Om partiklarna självorganiserar sig i en regelbunden struktur bildas en s.k. fotonisk kristall, vilket skapar fotoniska bandgap för ljus där vissa våglängder är tillåtna att passera genom bandgapet medan andra inte är det. Det kan användas för att kunna styra att en eller flera färger kan reflekteras eller transmittas genom strukturen med ett visst riktningberoende. Materialen undersöktes med svepelektronmikroskopi (SEM), spektrofotometri inom våglängdsintervallet 250–2500 nm med integrerande sfär och vinkelberoende reflektansmätningar (utfördes vid FOI), ljusspridningsmätningar med ellipsometer, s.k. IP-BRDF (*In-Plane Bidirectional Reflectance Distribution Function*), CIEL\*a\*b\* färgkoordinater och ytojämnhet. Resultaten visar att en rad olika färger kan skapas med denna metod men att färgerna för polyamid är renare och ljusare. Polyamid är dessutom den enda textilen som frambringar iridescenta färger eftersom dess yta har en tillräckligt jämn ytstruktur, vilket kunde konstateras med SEM. Det visade sig även att viktig mätmetodik för att studera iridescens är vinkelberoende reflektans med spektrofotometri och IP-BRDF, tillsammans med CIEL\*a\*b\* färgkoordinater.

<sup>17</sup> ACROSS: Adaptive Camouflage foR sOldierS and vehicleS

<sup>18</sup> ACSALS: Advanced Solutions for Camouflage of Land Systems using smart and adaptive materials

Inom ett annat arbete med självorganiserande material har vi tillsammans med Linköpings universitet studerat kompositerna av nanocellulosa (hydrerad bakteriell cellulosa) och guldnanopartiklar för att skapa bredbandig ljusabsorption med unika mekaniska egenskaper [131]. Möjliga tillämpningar kan t.ex. vara lågreflekterande beläggningar, absorption av solenergi och fotokatalys. Beläggningen är robust, mjuk, mekaniskt flexibel och kan mycket väl anpassa sig till olika typer av ytor, såsom buktiga och ojämna. Materialet tillverkades genom att nanocellulosans nanofibriller kunde adsorbera stora mängder guldnanopartiklar, vilket spektralt breddade ytplasmonresonansbandet för nanopartiklarna och därmed skapa en mycket svart yta. Absorptionen uppmättes till över 96% inom både VIS och NIR.

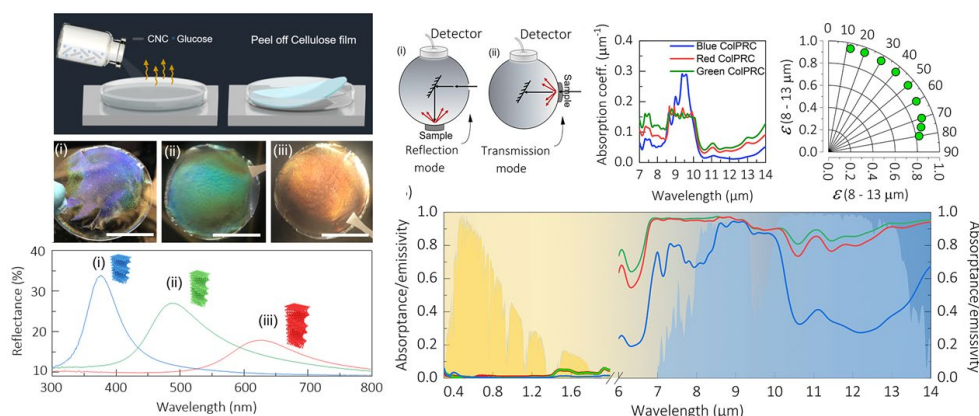
### 5.1.6 Metamaterial och metaytor

Metamaterial är komponenter uppbyggda av repeterande mönster. Mönstrets utformning, geometri och storlek ger de elektromagnetiskt manipulerande egenskaperna som eftersöks. I konventionella material uppstår de repeterande mönstren i kristallstrukturen. Storleksordningen på elektromagnetisk strålning som kan manipuleras är då begränsad till enhetscellens storlek i materialet. Metamaterial kan designas och behöver därför inte begränsas av materialet den är uppbyggd av. Metamaterial kan konstrueras med tillämpningar från UV till radar.

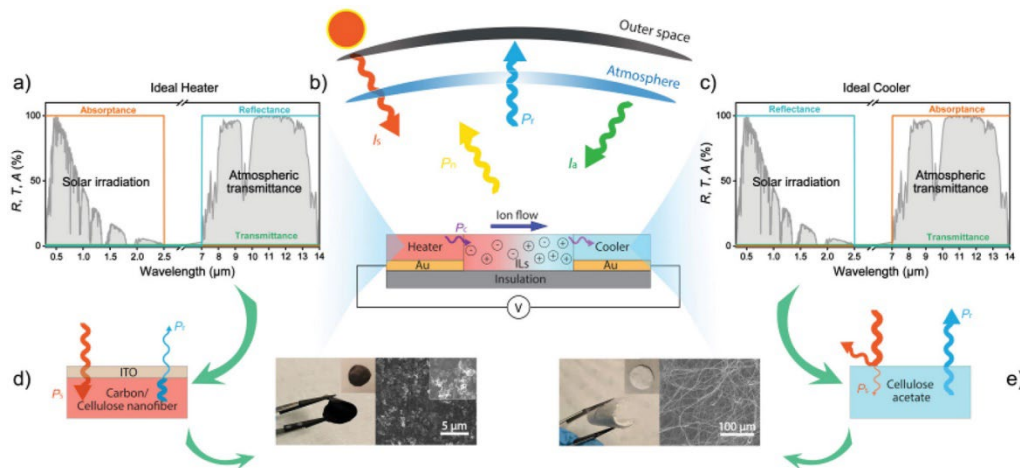
Metaytor är tvådimensionella metamaterial. Det är i många fall möjligt att ersätta metamaterial med metaytor, vilket kan förenkla tillverkningen. Metamaterial och metaytor öppnar även upp för avancerade optiska tillämpningar med mycket enkla och tillgängliga material eftersom de inte är begränsade av kemien.

### 5.1.7 Material för passiv kylning

Material som har en hög emittans i våglängdsområdet 8–13  $\mu\text{m}$ , där atmosfären har ett genomsläppligt fönster till yttre rymden, samt har en i övrigt låg solabsorption kan fungera som material för passiv kylning även under dagtid [132]. Det är ett koncept som togs fram på 70-talet [133] men som på senare år har renderat ett stort intresse [134,135]. Material för passiv kylning kan vara av organisk eller oorganisk karaktär eller en blandning. FOI har bidragit till forskning kring området i samarbete med LiU där man utvecklat cellulosa-baserade materialkompositerna [136–139] som även kan färgas med strukturell färgning [140] för att anpassa signaturen inom det visuella våglängdsområdet, se Figur 8. Det senaste konceptet är baserat på termoelektriskt material som drivs av differensen mellan material med hög respektive låg emittans, se Figur 9.



Figur 8: Koncept där nanokristallin cellulosa blandat med glukos bildar strukturellt reflekterande färger genom självordning till periodiska strukturer [140]. Olika blandningar ger olika färger och emittiviteten i våglängdsområdet 8–13  $\mu\text{m}$  för dessa material är i paritet med fotoniska oorganiska alternativ [141] men med något lägre strukturell reflektion.



Figur 9: Koncept där ett jonbaserat termoelektriskt material drivs av temperaturdifferensen som bildas av ett högemitterande material i våglängdsområdet 8–13  $\mu\text{m}$  och ett transparent lågemitterande material, indium-tennoxid (ITO) [139].

## 5.2 Radarabsorberande material

Inom signaturmaterial är ett intressant forskningsområde radarabsorberande material. Forskningsaktiviteter inom det området redovisas i det här avsnittet.

### 5.2.1 Material och struktur för radarsignaturanpassning

FOI har via deltagande i ALOCAS, ett EDA-projekt där deltagandet under åren 2020–2023 finansierades av FoT-projektet Signaturmaterial, jobbat med material och strukturer för radartillämpningar. FOI bidrog med arbete på grafen och beräkning av strukturer [124].

2D-materialet grafen beskrivs ha potential att bidra till förbättrade egenskaper inom bl.a. signaturanpassning. För att kunna prediktera dess potential inom området var det önskvärt att mäta dess materialegenskaper. Eftersom det finns olika kvalitet på grafen och många snarare är grafit än grafen skiljer sig egenskaperna åt, beroende på framställningsmetod och batch. I en studie fick vi tag på högkvalitativt grafen och dispergerade det i epoxi för att mäta upp de elektromagnetiska egenskaperna. Resultatet blev dock inte särskilt lyckat eller lovande men det har vi ändå lärt oss av, se [122,124] för mer detaljer.

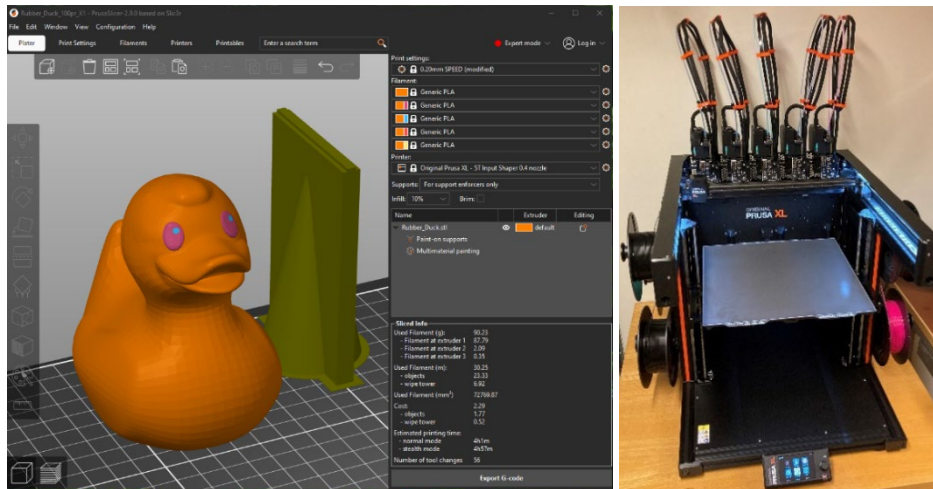
Under 2025 genomfördes ett examensarbete för att studera material för radarsignaturanpassning. Materialet strontiumhexaferrit ( $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) i pulverform har bearbetats i kulkvarn och studerats<sup>19</sup>. Materialet är ferrimagnetiskt och dess magnetiska egenskaper beror av partikelstorleken då den passerar en kritisk storlek. Då elektromagnetisk strålning interagerar med magnetiska partiklar absorberas delar av vågens energi. Partiklarnas elektromagnetiska absorptionsförmåga kan därmed varieras och utnyttjas bland annat för radarsignaturanpassning.

### 5.2.2 3D-utskrift av radarabsorberande material

Användning av 3D-skrivare och slicer-mjukvara, se Figur 10, har möjliggjort utskrift av komplexa strukturer och geometrier som tidigare ej var möjligt med konventionell tillverkningsteknik. Med elektriskt ledande polymerfilament kan material med radarabsorberande egenskaper designas och skrivs ut med hjälp av en 3D-skrivare. Tekniken gör att man kan deponera material med önskade egenskaper i en 3D-struktur med varierande mönster och form. Parametrarna som kan varieras vid utskrift är många, som till exempel storlek på munstycke, materialflöde, temperatur, utskriftsvinkel med mera vilket

<sup>19</sup> Lisa Olsson *Investigation of  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  Particle Size Distribution and its Effect on Radar Absorption* MSc. Thesis, 2025, LITH-IFM-A-EX--25/4717--SE.

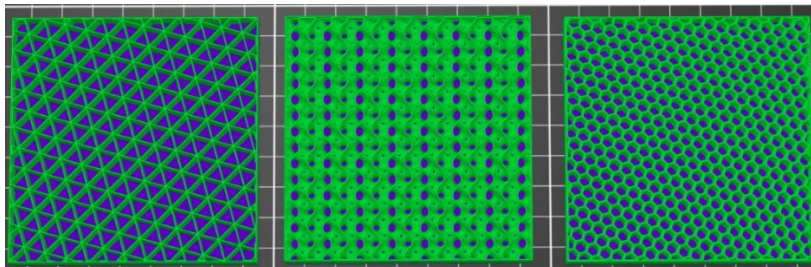
gör området väldigt brett och flexibelt samtidigt som det snabbt blir komplext och kan vara tidsödande att studera.



Figur 10.a) Slicer-mjukvara och b) en 3D-skrivare av FDM-typ (Prusa XL), bilder tagna av P. Rejmstad.

### 5.2.3 Examensarbeten kopplat till 3D-utskrifter

Tre examensarbeten genomfördes på FOI under 2024 med koppling till 3D-utskrivna material varav två beskrivs nedan. I examensarbetet *Structural effects on 3D-printed radar materials*<sup>20</sup> undersöktes effekten av utvalda fyllnadsmönster kopplat till materialens elektromagnetiska egenskaper, se Figur 11. Kopplingar mellan materialens strukturparametrar och mikrovågsabsorptionen för vissa frekvenser studerades. Resultat från studien visade att absorptionen i viss mån gick att styra genom att variera strukturparametrar hos materialen vilket betyder att materialen kan skräddarsys för att passa militära tillämpningar.



Figur 11. Tre olika fyllnadsmönster för 3D-utskrifter, *triangles*, *gyroid* och *honeycomb*.

Det andra examensarbetet *Magnetiska lager i 3D-printade radarmaterial*<sup>21</sup> behandlar 3D-utskrifter med magnetiskt material och dess elektromagnetiska egenskaper. I arbetet undersöktes hur tjockleken av lager med magnetiskt material påverkar materialets mikrovågsabsorberande förmåga. Materialet som undersöktes krävde dock allt för tjocka skikt för att vara användbart i de avsedda applikationerna. Resultatet av att kombinera det magnetiska materialet och ett elektriskt ledande material likt en s.k. Salisbury-skärm såg dock mer lovande ut.

<sup>20</sup> B. Lindqvist, *Structural Effects on 3D-Printed Radar Materials*, BSc Thesis, ISRN: LIU-IEI-TEK-G--24/02484--SE, 2024.

<sup>21</sup> H. Enander, *Magnetiska lager i 3D-printade radarmaterial*, BSc. Thesis, ISRN: LIU-IEI-TEK-G--24/02476--SE, 2024.

## 6 Kompetensutveckling

Kompetensutveckling är en väldigt viktig del av arbete inom projektet eftersom FOI nyanställer många samtidigt som personer med lång erfarenhet går i pension. Förutom nedanstående aktiviteter har även vidareutbildning av framförallt nyanställd personal skett via att parallellt arbeta med erfaren kollega. Det kan t.ex. ske genom att låta nyanställda vara med när erfaren personal genomför praktiska saker såsom mätningar eller fältförsök. FOI tillämpar även mentorskap för nyanställda för att skapa en möjlighet till bollplank för nyanställda i allt från projektrelaterade aktiviteter men också mer generella frågeställningar som t.ex. hantering av sekretess.

### 6.1 Kurs om färg och ytbeläggningsteknologi

En medarbetare genomförde kursen *Paint & Coating Technology: Theory and Practice*, en KTH-kurs<sup>22</sup> som ges tillsammans med SVEFF (Sveriges Färg och Lim Företagare). Kursen ger en bred bas inom området färg- och ytbeläggningsteknologi, och är även en diplomkurs för olika företag, exempelvis Scania, Sherwin-Williams Sweden AB och Saint-Gobain Sweden AB.

Kursen behandlade kemi, organisk kemi och vilka komponenter som finns i en färg. En färg består av bindemedel, lösningsmedel, pigment, fyllnadsmedel och additiv. Ytkemi och kolloider är en stor del av vad som gör att en stabil färg kan skapas.

Bindemedel är det som binder samman pigment och andra additiv till en film på substratet när lösningsmedlet har evaporerat. Lösningsmedel kan antingen vara vatten eller organiska lösningsmedel och generellt går industrin mot att använda vattenbaserad färg. Detta på grund av de hälsofarliga risker som hör samman med organiska lösningsmedel. Det finns många olika bindemedel, som passar till olika typer av substrat och additiv. Pigment delas in i organiska eller oorganiska och har till uppgift att täcka substratet samt ge en kulör till färgen. En färg består också oftast av någon typ av fyllnadsmedel, som fyller ut färgen och ger den rätt konsistens beroende på hur appliceringen ska ske (konventionell sprutmålning, måla med pensel, elektrostatisk sprutmålning osv.). Additiv är skumbildningsmedel, vätning- och dispergeringsmedel, reologimodifierare och koalescerande medel. Det krävs en noggrann blandning av dessa medel för att färgen ska få önskade egenskaper då en del av additiven motverkar varandra. För vattenbaserade färger behöver ofta biocider tillsättas för att undvika att mögeltillväxt uppstår i färgen, och/eller att svamp/alg tillväxt uppstår på en målade yta. Allt fler biocider förbjuds då de har en negativ inverkan på människor och miljö.

Substratet eller underlaget för en färg behöver också förberedas på rätt sätt för att få en god vidhäftning. Beroende på om substratet består av metall, trä eller plast måste det rengöras på rätt sätt för att optimera resultatet.

Det finns många standarder inom färg- och ytbeläggningsbranschen som företag kontrollerar sina produkter mot. REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*) är en viktig del av detta för att undvika att farliga ämnen hamnar i produkter.

Att framställa en färg kan ta flera år, från att man börjar testa olika formuleringar i labbet till att det finns en kommersiell produkt. Det begränsar färgföretags möjligheter att experimentera med olika additiv för att utveckla mer specifika egenskaper eller att anpassa färg för specifika ändamål. FOI har en större möjlighet att testa nya och intressanta additiv i liten skala för specifika tillämpningar, se avsnitt 5.1.2.

<sup>22</sup> <https://www.kth.se/student/kurser/kurs/CK107V/?l=en> Hämtad 2025-01-31

## 6.2 Kurs hos Retsch om malning med kulkvarn

FOI har deltagit med två representanter i en kurs hos Retsch i Haan, utanför Düsseldorf, Tyskland. Retsch är en tysk tillverkare av utrustning för malning, siktning och provtagning av pulver. FOI har under 2023 köpt in och installerat en Retsch MM 500 Control kulkvarn och tillsammans med inköpet av utrustningen ingick kursen, se avsnitt 4.3 för mer information kring utrustningsmetodiken. Kursen inleddes med övergripande teori kring malning, homogenisering, siktning och hur man tar ut ett representativt pulverprov. Därefter genomfördes demonstrationer på kvarnar ur produktsortimentet. I samband med demonstrationer diskuterades malningsparametrar och det gavs tips på hur man uppnår tillfredsställande homogen malning beroende på tillämpning.

## 6.3 Seminarium med Prof. Daniel Aili

Under hösten 2024 bjöds Daniel Aili från IFM, LiU, in att hålla föredrag om sin forskning. Forskningen handlar om självassociation, dvs. nanometersmå byggstenar som spontant konstruerar sig till avancerade strukturer bara genom att de blandas ihop i ett provrör. Det ger möjligheter att skapa artificiella nanostrukturerade material med intressanta egenskaper. Självassociation liknar hur många material i naturen bildas och forskningen handlar om hur man kan härma naturen för att tillverka avancerade syntetiska nanostrukturer.

## 6.4 Studiebesök Linköpings universitet i Norrköping

Våren 2024 besökte några från projektet en forskargrupp vid ITN, LiU i Norrköping. Vi fick veta mer om deras forskning och även se renrum och hur tillverkning av aerogeler går till. Vi fick möjlighet att mäta radaregenskaper på några prover.

## 6.5 Studiebesök Sverige Lantbruksuniversitet, Uppsala

FMV arrangerade ett studiebesök hos forskargruppen som utvecklar och skalar upp tillverkning av konstgjord spindeltråd [142]. FOI deltog via olika representanter bl.a. en som representerade signaturmaterial. Spindeltråd är sedan länge känt för sina intressanta mekaniska egenskaper [143] men dess elektromagnetiska egenskaper känner man inte till. Studiebesöket innefattade en presentation av forskningen samt en rundvandring i labbet inklusive en demonstration av konstgjord spindeltrådstillverkning i labbskala.

## 6.6 Spektroskopi för strukturegenskapskorrelationer

Ett materials egenskaper bestäms traditionellt genom sin kemiska sammansättning men den kemiska molekylstrukturen påverkar också egenskaperna. För att kunna förstå och hitta samband mellan molekylstrukturen och egenskaper behöver man studera den kemiska strukturen. Det kan göras på flera olika sätt varav FoT-projektet har bidragit till att bygga kompetens inom Ramanspektroskopi och Röntgenabsorptionsspektroskopi.

Ramanspektroskopi är en metod för att bestämma vibrationsmoder för molekylstrukturen och bygger på inelastisk spridning av fotoner. Ramanspridning uppstår när en foton interagerar med molekylstrukturen och antingen exciterar eller deexciterar material. Excitationerna som fotonen växelverkar med är vanligtvis vibrationer men kan även vara magnetiska eller elektroniska. I Ramanspektroskopi använder man sig av laser för att bestråla ett prov. Ett Ramanspektrum ger fingeravtrycket för molekylstrukturen i materialet som behöver identifieras med t.ex. referensmaterial där molekylstrukturen är känd eller

genom att variera sammansättningen för att få förändringar i Ramanspektrumet. Ramaneffekten kan korreleras till ändringen av molekylstrukturens polarisabilitet och kan ge kompletterande information om molekylstrukturen som inte IR-spektroskopi kan ge.

Röntgenabsorptionsspektroskopi (XAS, *X-ray Absorption Spectroscopy*) är en avancerad teknik för att studera ett specifikt grundämnes lokala omgivning i ett material. Mätningar kräver normalt synkrotronstrålning vid specifika synkrotronanläggningar som t.ex. MAX IV<sup>23</sup>. För varje specifikt grundämne krävs en viss mängd energi för att excitera kärnelektroner (dvs. de elektroner som inte är valenselektroner). Energin som absorberas då ett grundämnes kärnelektroner exciteras kan mätas och ger upphov till ett spektrum med absorption och multipel resonansspridning som ger information om grundämnets oxidationstal, koordinationstal och närmaste atomer. Utvärderingen av det resulterande absorptionsspektrumet är komplext och kräver ofta att man modellerar röntgenabsorptionen alternativt att man jämför absorptionsspektra med referensmaterial där den kemiska strukturen är mer känd. Tekniken lämpar sig väl för att studera specifika grundämnen som förekommer även i låga halter i komplexa material såsom keramer, glas, mineraler, jord, askor, organometalliska material etc. för att skapa en djupare förståelse för den kemiska strukturen som påverkar fysikaliska egenskaper.

---

<sup>23</sup> <https://www.maxiv.lu.se/about-us/the-max-iv-facility/> Hämtad 2025-05-27.

## 7 Samverkan

Under projektperioden 2023–2025 har ett antal andra projekt av olika art löpt parallellt med Signaturmaterial. Verksamhet som bedrivs inom dessa projekt samutnyttjar personal och projekten kan därmed i viss mån utbyta erfarenheter och gagna varandra, därför nämns några av dem här.

Utöver samlingsbeställningen finns ett antal enskilda beställningar som ligger nära Signaturmaterial där man genom dialog ser till att dubbelarbete inte utförs. Några exempel är *Krav för maskeringsnät* eller beställningar gällande lågsignaturfrågor för specifikt *Låga signaturer för vägval flyg och flygtillämpningar* (LO-VVP) men även förstudie *Maskininlärning för Low Observables*, (MALLO).

*Material och Produktionsteknik* [123,144] samt egna satsningar som 3D-printing för drönarskydd eller ett internt pitchprojekt som löpt under 2025, *Material från Svensk flora och fauna*.

Verksamhet som är relevant för Signaturmaterial bedrivs även inom andra projekt finansierade av annan part och även i internationella samarbeten vilka beskrivs nedan. Signaturmaterial bevakar relevant verksamhet och förvaltar relevanta resultat.

### 7.1 Nationell

Samverkan med Universitet och Högskola sker specifikt med Linköping och Uppsala universitet. Denna sker inom främst optiska och termiska material och ytegenskaper, självorganiserande och adaptiva material samt tillhörande analysmetoder för dessa. Samverkan bedrivs genom bl.a. forskningssamarbeten, föreläsningar och examensarbeten, se avsnitt 8.1. Utökad och mer strategisk samverkan är önskvärd.

### 7.2 Internationell

Internationell samverkan där projektet eller projektmedlemmar är involverade innefattar såväl bilateral samverkan, EDA- och EDF-projekt samt Natogrupper.

#### 7.2.1 Bilateral samverkan

Inom bilateral samverkan har utbyte skett med Storbritannien och Finland.

En bilateral workshop mellan Sverige och Storbritannien hölls i Linköping, våren 2023 på temat *Measurements and modelling of camouflage materials*. Hösten 2023 besökte en delegation från FOI Qinetiq och Malvern Optics i Storbritannien för att försöka utvidga samverkan. MoU (*Memorandum of Understanding*) och det specifika samverkansavtalet löpte ut vid årsskiftet 2023–2024 och på grund av interna nationella orsaker har Storbritannien ännu inte kunnat uppta förhandlingarna, även om MoU har återupprättats.

Samverkan finns även med FDRA (*Finnish Defence Research Agency*) i Finland. Under perioden har projektet Signaturmaterial deltagit i en workshop i Finland 2023 och i övrigt i möten ca två ggr/år för att utbyta information om nya material.

#### 7.2.2 NATO

Under perioden har projektet medverkat i följande NATO STO (*Science and Technology Organization*) grupperr: MP-AVT-371, AVT-SET-417, AVT-SCI-ET-241. De beskrivs kort nedan.

NATO AVT 371 *Materials and technologies for electro-optical camouflage* avslutades med en Natoworkshop i London om material för EO-kamouflage. Vid den hölls två presentationer från FOI och projektet om ACAMSII och nanocellulosa.

FOI deltar även i den efterföljande gruppen AVT-SET-417 (RTG) *Materials for Thermal Infrared Camouflage – Development and Characterization* samt NATO –AVT-SCI-ET-241 och dess fortsättning AVT-SET-HFM-SAS-433 (RTG) *Electro-optic Scatterometry - application in computational platform signature modelling* som startade 2025.

AVT genomför årligen två s.k. *Panel Business Meetings* (PBMs, panelveckor), dvs. mötesveckor då panelen, alla kommittéer, underkommittéer och i stort sett alla pågående aktiviteter inom AVT har möten på samma plats. FOI deltog med materialintresserad representant vid möten våren 2024 i Ottawa, Kanada, hösten 2024 i Koblenz, Tyskland samt vid höstmötet 2025 i Riga.

### 7.2.3 EDA – European Defence Agency

Deltagandet i EDA-projekt finansieras vanligtvis av respektive länders försvarsmyndigheter eller motsvarande.

#### 7.2.3.1 ALOCAS

Signaturmaterial medfinansierade under perioden 2023–2024 medverkan i EDA-projektet ALOCAS (*Advanced Low observable coatings and Structures*).

Projektet ALOCAS<sup>24</sup>, som avslutades i december 2023, var ett internationellt EDA-projekt som syftade till europeisk utveckling av teknologi för lågsignaturmaterial, för flygande plattformar. Projektet genomfördes under perioden december 2020 till november 2023. Fem parter var aktiva i ALOCAS. Från Sverige deltog Saab AB Aeronautics (projektansvarig), Saab Dynamics AB och FOI. Från Nederländerna deltog Royal NLR (Royal Netherlands Aerospace Centre) och AkzoNobel Aerospace Coatings. Deltagandet finansierades av respektive länders försvarsmyndigheter. FOI:s deltagande finansierades av Försvarsmakten via FoT Sensorteknik och Signaturanpassning samt genom ett uppdrag från Saab AB angående lågemissiv färg.

Målet med ALOCAS var att förbättra europeisk förmåga att undgå upptäckt för att öka tillgängligheten och friheten att verka i en fiendlig omgivning. Arbetet specificerades i en *Research Technical Proposal*<sup>25</sup>. Projektets resultat och slutsatser är av särskild betydelse för Försvarsmakten. FOI har presenterat resultat i form av ett memo [124]. Projektet ALOCAS presenterades även vid *European Defence Innovation Days 2025* (EDID25) i Krakow, Polen.

Under perioden har arbetet för att möjliggöra fortsatt samverkan varit i fokus och ett nytt projektförslag är inlämnat under namnet ALOMAC med förväntad start hösten 2025.

#### 7.2.3.2 ASCALS

*The Advanced Solutions for Camouflage of Land Systems using smart and adaptive materials* (ASCALS) syftade till att finna nya material och tillämpningsprocesser för aktivt och adaptivt kamouflage. Projektet ASCALS, som avslutades mars 2025, var ett 18+3 månaders projekt. Det var ett internationellt samarbetsprojekt som syftade till att utveckla avancerade och smarta material för kamouflage, för tillämpning framförallt för fordon och landomänen. Projektet arbetade med material i såväl visuellt, infrarött som i radarfrekvenser. Man ville ge möjlighet till ökat skydd genom radarabsorption och tekniker för minskad synlighet utan att förändra vikt eller rörlighet. Även om man siktade på landomänen kan landvinningar förmodligen användas inom andra områden.

<sup>24</sup> ALOCAS: *Advanced Low Observable Coatings and Structures*, EDA-B.PRJ.RT.796.

<sup>25</sup> *Research Technical Proposal (RTP) – Advanced Low Observable Coatings and Structures “ALOCAS”*, October 1, 2020.

Effektmålet med ASCALS var att förbättra europeisk förmåga att samarbeta kring smarta material och styrbarhet. Arbetet specificerades i en *Research Technical Proposal*<sup>26</sup>. Resultaten från ASCALS har tillämpningar inom ett brett spektrum och är på TRL 1–3. FOI bidrog främst med radarmätningar på prover i labb och projektet var således beroende av kompetens inom området som byggts upp i Signaturmaterial. Diskussioner kring fortsättning pågår.

### 7.2.3.3 HIMMODA

HIMMODA, *Hybrid multifunctional metamaterials in defence applications*, är ett EDA-projekt under flera CapTech (*Capability Technology Areas*). Det har drabbats av flera förseningar. FOI deltog när projektet demonstrerades vid European Defence Innovation Days 2025 (EDID25), Krakow Polen.

### 7.2.4 EDF – European Defence Fund

EDF-projektet ACROSS (*Adaptive Camouflage for soldiers and vehicles*), startade 2023 och består av ett konsortium av kontakter från det tidigare projektet ACAMSII, Preparatory Action for Defence Research (PADR) och från EDA HIMMODA. ACROSS är ytterligare ett exempel på ett projekt som tematiskt till viss del matchar Signaturmaterials intressen.

---

<sup>26</sup> *Research Technical Proposal (RTP) – Advanced Low Observable Coatings and Structures “ALOCAS”*, October 1, 2020.

## 8 Kunskaps spridning

Projektet har bidragit vid utbildning av examensarbetare och har presenterat resultat från projektet vid SPIE. Från samarbete med LiU har även en tidskriftspublikation publicerats. Förutom att FOI bidrar till kunskaps spridning är dessa aktiviteter sätt att få nya samarbetspartners, nyanställda och kvalitetssäkring genom peer-review.

### 8.1 Examensarbeten

- E. Örtenberg, *Optical properties of water absorbing textiles for camouflage*, Linköping University, Dept. of Physics, Chemistry and Biology, MSc. thesis, 30 ECTS, Engineering Biology, Spring Term 2023, LITH-IFM-A-EX-22/4211-SE.
- M. Håkansson, *Optical studies of silver nanowires as IR-Reflective Pigments in low-emissive paint*, Linköping University, Dept. of Physics, Chemistry and Biology, MSc. thesis, 30 ECTS, Physics, Spring term 2023, LITH-IFM-A-EX-23/4234-SE.
- H. Enander, *Magnetiska lager i 3D-printade radarmaterial*, Linköpings universitet, Institutionen för ekonomisk och industriell utveckling Examensarbete, 16 hp | Produktrealisering 2024 | LIU-IEI-TEK-G-24/02476-SE.
- L. Olsson *Investigation of SrFe12O19 Particle Size Distribution and its Effect on Radar Absorption*, Linköping University, Department of Physics, Chemistry and Biology (IFM), MSc. thesis, 30 ECTS | M.Sc. in Applied Physics Spring term 2025, LITH-IFM-A-EX-25/4717-SE.
- L. Serrander, *Methodology for BRDF Measurements in Outdoor Conditions with Solar Illumination*, Linköping University, Department of Physics, Chemistry and Biology, MSc. thesis, 30 ECTS, Physics, Spring term 2025, LITH-IFM-A-EX-25/4720-SE.

### 8.2 Konferensbidrag

- E. Örtenberg, P. Rejmstad, and C. Åkerlind, *Optical properties of water absorbing textiles for camouflage*, in Target and Background Signatures IX, K. Stein and R. Schleijsen, Eds., p. 10, SPIE, Amsterdam, Netherlands (2023) [doi:10.1117/12.2683969].
- J. Silander, P. Rejmstad, T. Hallberg, and C. Åkerlind, *Nanocellulose-based films for camouflage applications*, in Target and Background Signatures IX, K. Stein and R. Schleijsen, Red., Amsterdam, Netherlands: SPIE, okt. 2023, s. 8. [doi: 10.1117/12.2684079].
- M. Håkansson, T. Hallberg, and E. Örtenberg, *Low-emissive paint with silver nanowires*, in Target and Background Signatures IX, K. Stein and R. Schleijsen, Eds., p. 12, SPIE, Amsterdam, Netherlands (2023) [doi:10.1117/12.2684997].
- L. Serrander, T. Hallberg, J. Silander, H. Elmunger, *Methodology for outdoor scatterometry using solar illumination*, in Target and Background Signatures XI, SPIE, Madrid, Spain (2025).

### 8.3 Tidskriftspublikationer

- O. Eskilson et al., *Self-Assembly of Soft and Conformable Broadband Absorbing Nanocellulose-Gold Nanoparticle Composites*, ACS Appl. Mater. Interfaces 16(39), 52894–52901 (2024) [doi:10.1021/acsami.4c10244].
- F. Ram et al., *Transparent Wood for Passive Radiative Cooling of Solar Absorbers* Nano Letters (2025) [doi: 10.1021/acs.nanolett.5c02994].

## 8.4 Övrig kunskapsspridning

Övrig kunskapsspridning omfattar presentationer av olika slag samt övriga rapporter som memo.

### 8.4.1 Presentationer

- ”Belysning och reflektion kring några materialstudier inom Signaturmaterial”, SAMSAT
- International Symposium on Indirect Protection, Bad Raichenhall, 2023
- NATO AVT Spring meeting, conference on camouflage materials (x2) – om Nanocellulosa och ACAMSII
- Seminarium: Material för kamouflage
- Seminarium om svensk försvarsforskning, Linköping 2025.

### 8.4.2 Memon

- L. H. Karlsson, *Färdplan: 2D-material för optisk signaturanpassning*, FOI Memo 8152, 2023.
- H. Kariis, *Lärdomar från EU PADR-projektet ACAMSII angående adaptivt kamouflage för soldaten*, FOI Memo 8251, 2023.
- T. Hallberg, J. Silander, E. Örtenberg, och C. Åkerlind, *Belysning och reflektion kring några materialstudier*, FOI Memo 8668, 2024.
- J. Fagerström, T. Hallberg, och C. Åkerlind, *Resultat och lärdomar från EDA-projektet ALOCAS ”Advanced Low Observable Coatings and Structures”*, FOI Memo 8541, 2024.

## 9 Framtida arbete

Material är ett strategiskt område, avancerade material i synnerhet, och av relevans för framtida signaturmaterial. Den civila forskningen har drivit området men i och med en förändrad omvärld ökar satsningen även inom totalförsvaret. Trender som påverkar framtidens försvar och slagfält, inklusive material för signaturanpassning, är bl.a. artificiell intelligens och maskininlärning även för design av material, där satsningar sker i omvärlden. Även bioteknik där biologiska system används i tekniska tillämpningar kan på sikt påverka framtida forskning [145]. FoT Signaturmaterial avser att fortsätta arbetet den kommande perioden med samma frågeställningar:

- Vilken utveckling inom materialvetenskap bedöms användbar för att förbättra signaturanpassning?
- Hur bör signaturmaterial designas för att vara effektiva, funktionella och framtidssäkrade?

## 10 Referenser

- [1] P. Nordlund, P. Bäckström, M. Johansson, Effektiv materielförsörjning - ett incitamentsperspektiv på materielförsörjningen, Swedish Defense Research Agency, FOI, Kista, 2015.
- [2] M. Hallberg, H. Kariis, L. Bohman, En klädsam historia, (2019). <https://www.forsvarsmakten.se/sv/information-och-fakta/var-historia/artiklar/en-kladsam-historia/> (accessed November 15, 2024).
- [3] D. Letalick, L. Axelsson, En kompakt hyperspektral kamera, Swedish Defense Research Agency, FOI, Linköping, 2019.
- [4] D. Gustafsson, D. Bergström, H. Petersson, Hyperspektral signalbehandling med Deep Learning, Swedish Defense Research Agency, FOI, 2024.
- [5] Vetenskapsrådet, Forskningsbarometern 2023: svensk forskning i internationell jämförelse, Vetenskapsrådet, Stockholm, 2023.
- [6] N.T. Cervin, C. Aulin, P.T. Larsson, L. Wågberg, Ultra porous nanocellulose aerogels as separation medium for mixtures of oil/water liquids, *Cellulose* 19 (2012) 401–410. <https://doi.org/10.1007/s10570-011-9629-5>.
- [7] J. Garemark, J.E. Perea-Buceta, D. Rico Del Cerro, S. Hall, B. Berke, I. Kilpeläinen, L.A. Berglund, Y. Li, Nanostructurally Controllable Strong Wood Aerogel toward Efficient Thermal Insulation, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 14 (2022) 24697–24707. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c04584>.
- [8] J. Liu, M. Nero, K. Jansson, T. Willhammar, M.H. Sipponen, Photonic crystals with rainbow colors by centrifugation-assisted assembly of colloidal lignin nanoparticles, *Nat. Commun.* 14 (2023) 3099. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38819-5>.
- [9] Y. Zheng, A. Moreno, Y. Zhang, M.H. Sipponen, L. Dai, Harnessing chemical functionality of lignin towards stimuli-responsive materials, *Trends Chem.* 6 (2024) 62–78. <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2023.12.001>.
- [10] C. Montanari, Y. Ogawa, P. Olsén, L.A. Berglund, High Performance, Fully Bio-Based, and Optically Transparent Wood Biocomposites, *Adv. Sci.* 8 (2021) 2100559. <https://doi.org/10.1002/advs.202100559>.
- [11] K.M.O. Håkansson, I.C. Henriksson, C. De La Peña Vázquez, V. Kuzmenko, K. Markstedt, P. Enoksson, P. Gatenholm, Solidification of 3D Printed Nanofibril Hydrogels into Functional 3D Cellulose Structures, *Adv. Mater. Technol.* 1 (2016) 1600096. <https://doi.org/10.1002/admt.201600096>.
- [12] S. Darabi, M. Hummel, S. Rantasalo, M. Rissanen, I. Öberg Månsson, H. Hilke, B. Hwang, M. Skrifvars, M.M. Hamed, H. Sixta, A. Lund, C. Müller, Green Conducting Cellulose Yarns for Machine-Sewn Electronic Textiles, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 12 (2020) 56403–56412. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c15399>.
- [13] J. Berglund, D. Mikkelsen, B.M. Flanagan, S. Dhital, S. Gaunitz, G. Henriksson, M.E. Lindström, G.E. Yakubov, M.J. Gidley, F. Vilaplana, Wood hemicelluloses exert distinct biomechanical contributions to cellulose fibrillar networks, *Nat. Commun.* 11 (2020) 4692. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18390-z>.
- [14] E. Oliaei, P. Olsén, T. Lindström, L.A. Berglund, Highly reinforced and degradable lignocellulose biocomposites by polymerization of new polyester oligomers, *Nat. Commun.* 13 (2022) 5666. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33283-z>.
- [15] S. Koskela, S. Wang, L. Li, L. Zha, L.A. Berglund, Q. Zhou, An Oxidative Enzyme Boosting Mechanical and Optical Performance of Densified Wood Films, *Small* 19 (2023) 2205056. <https://doi.org/10.1002/smll.202205056>.
- [16] A. Di, C. Schiele, S.E. Hadi, L. Bergström, Thermally Insulating and Moisture-Resilient Foams Based on Upcycled Aramid Nanofibers and Nanocellulose, *Adv. Mater.* 35 (2023) 2305195. <https://doi.org/10.1002/adma.202305195>.
- [17] C. Schiele, A. Di, S.E. Hadi, P.K.B. Rangaiyah, R. Augustine, L. Bergström, Hybrid Foams based on Multi-Walled Carbon Nanotubes and Cellulose Nanocrystals for Anisotropic Electromagnetic Shielding and Heat Transport, *Adv. Mater. Interfaces* 11 (2024) 2300996. <https://doi.org/10.1002/admi.202300996>.

- [18] S.E. Hadi, E. Möller, S. Nolte, A. Åhl, O. Donzel-Gargand, L. Bergström, A. Holm, Hierarchical Incorporation of Reduced Graphene Oxide into Anisotropic Cellulose Nanofiber Foams Improves Their Thermal Insulation, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16 (2024) 45337–45346. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c09654>.
- [19] S. Kashiwaya, Y. Shi, J. Lu, D.G. Sangiovanni, G. Greczynski, M. Magnuson, M. Andersson, J. Rosen, L. Hultman, Synthesis of goldene comprising single-atom layer gold, *Nat. Synth.* 3 (2024) 744–751. <https://doi.org/10.1038/s44160-024-00518-4>.
- [20] M. Dahlqvist, M.W. Barsoum, J. Rosen, MAX phases – Past, present, and future, *Mater. Today* 72 (2024) 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2023.11.010>.
- [21] A. VahidMohammadi, J. Rosen, Y. Gogotsi, The world of two-dimensional carbides and nitrides (MXenes), *Science* 372 (2021) eabf1581. <https://doi.org/10.1126/science.abf1581>.
- [22] D. Visser, D.Y. Chen, Y. Désières, A.P. Ravishankar, S. Anand, Embossed Mie resonator arrays composed of compacted TiO<sub>2</sub> nanoparticles for broadband anti-reflection in solar cells, *Sci. Rep.* 10 (2020) 12527. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69518-6>.
- [23] W. Johansson, A. Peralta, B. Jonson, S. Anand, L. Österlund, S. Karlsson, Transparent TiO<sub>2</sub> and ZnO Thin Films on Glass for UV Protection of PV Modules, *Front. Mater.* 6 (2019) 259. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00259>.
- [24] A. Dev, B. Dev Choudhury, A. Abedin, S. Anand, Fabrication of Periodic Nanostructure Assemblies by Interfacial Energy Driven Colloidal Lithography, *Adv. Funct. Mater.* 24 (2014) 4577–4583. <https://doi.org/10.1002/adfm.201400018>.
- [25] F. Vennberg, A.P. Ravishankar, S. Anand, Polarization dependent structural colors from tilted metallo-dielectric nanopillars, *Mater. Res. Express* 8 (2021) 046202. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abfa46>.
- [26] A.P. Ravishankar, M.A.J. Van Tilburg, F. Vennberg, D. Visser, S. Anand, Color generation from self-organized metallo-dielectric nanopillar arrays, *Nanophotonics* 8 (2019) 1771–1781. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0171>.
- [27] P. Nunes, S.C. Nunes, R.F.P. Pereira, R. Cruz, J. Rocha, A.P. Ravishankar, L. Fernandes, E. Bacelar, S. Casal, S. Anand, A.L. Crespí, M. Fernandes, V. De Zea Bermudez, The leaf of *Agapanthus africanus* (L.) Hoffm.: A physical-chemical perspective of terrestrialization in the cuticle, *Environ. Exp. Bot.* 208 (2023) 105240. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105240>.
- [28] S.C. Nunes, A.P. Gomes, P. Nunes, M. Fernandes, A. Maia, E. Bacelar, J. Rocha, R. Cruz, A. Boatto, A.P. Ravishankar, S. Casal, S. Anand, V.D.Z. Bermudez, A.L. Crespí, Leaf surfaces and neolithization - the case of *Arundo donax* L, *Front. Plant Sci.* 13 (2022) 999252. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.999252>.
- [29] S. Rodríguez, J. Rocha, M. Fernandes, A.P. Ravishankar, N. Steinbrück, R. Cruz, E. Bacelar, G. Kickelbick, S. Anand, A.L. Crespí, S. Casal, V. De Zea Bermudez, The Surfaces of the *Ceratonia siliqua* L. (Carob) Leaflet: Insights from Physics and Chemistry, *Langmuir* 37 (2021) 2011–2028. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c02806>.
- [30] J.S. Byun, Y. Song, J. Montero, J.-H. Yoon, L. Österlund, S. Kim, P. Song, Thermo-chromic properties and surface chemical states of reactive magnetron sputtered vanadium oxide thin films at various deposition pressures, *Vacuum* 230 (2024) 113679. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113679>.
- [31] J. Montero-Amenedo, Photochromism in rare earth oxyhydrides for large-area transmittance control, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 272 (2024) 112900. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.112900>.
- [32] H.-Y. Qu, J. Wang, J. Montero, Y. Li, L. Österlund, G.A. Niklasson, Multicolored absorbing nickel oxide films based on anodic electrochromism and structural coloration, *J. Appl. Phys.* 129 (2021) 123105. <https://doi.org/10.1063/5.0043673>.
- [33] A. Kwiatkowski, J. Smulko, K. Drozdowska, L. Österlund, T. Welearegay, Enhanced visible light-activated gas sensing properties of nanoporous copper oxide thin films, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 273 (2024) 112940. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.112940>.

- [34] D.F. Fernandes, L. Österlund, T. Kubart, Photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> deposited by reactive HiPIMS with long target-to-substrate distance, *Surf. Coat. Technol.* 467 (2023) 129659. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129659>.
- [35] S. Kim, J. Montero, Y.J. Choi, J.-H. Yoon, Y. Choi, P.K. Song, L. Österlund, Embedded nanopattern for selectively suppressed thermal conductivity and enhanced transparency in a transparent conducting oxide film, *Nano Energy* 103 (2022) 107757. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107757>.
- [36] S. Tang, L. Edman, Light-Emitting Electrochemical Cells: A Review on Recent Progress, in: N. Armaroli, H.J. Bolink (Eds.), *Photoluminescent Mater. Electroluminescent Devices*, Springer International Publishing, Cham, 2017: pp. 375–395. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-59304-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59304-3_12).
- [37] E. Zäll, J. Segerval, H. Mahmoodi, D. Perivoliotis, L. Edman, T. Wågberg, Achieving optically selective coatings of silica fixated carbon nanotubes for solar energy applications, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 278 (2024) 113202. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113202>.
- [38] E. Zäll, M. Järn, S. Karlsson, H. Tryggesson, M. Tuominen, M. Sundin, T. Wågberg, Aerosol-based deposition of broadband antireflective silica coating with closed mesoporous structure, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 250 (2023) 112078. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112078>.
- [39] E. Zäll, S. Karlsson, M. Järn, J. Segerval, P. Lundberg, T. Wågberg, Durability of antireflective SiO<sub>2</sub> coatings with closed pore structure, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 261 (2023) 112521. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112521>.
- [40] R. Brooke, K. Freitag, I. Petsagkourakis, M. Nilsson, P. Andersson Ersman, All-Printed Electrochromic Stickers, *Macromol. Mater. Eng.* 308 (2023) 2300044. <https://doi.org/10.1002/mame.202300044>.
- [41] U. Boda, J. Strandberg, J. Eriksson, X. Liu, V. Beni, K. Tybrandt, Screen-Printed Corrosion-Resistant and Long-Term Stable Stretchable Electronics Based on AgAu Microflake Conductors, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 15 (2023) 12372–12382. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c22199>.
- [42] U. Boda, I. Petsagkourakis, V. Beni, P. Andersson Ersman, K. Tybrandt, Fully Screen-Printed Stretchable Organic Electrochemical Transistors, *Adv. Mater. Technol.* 8 (2023) 2300247. <https://doi.org/10.1002/admt.202300247>.
- [43] N.K. Singh, V. Hjort, S.K. Honnali, D. Gambino, A. Le Febvrier, G. Ramanath, B. Alling, P. Eklund, Effects of W alloying on the electronic structure, phase stability, and thermoelectric power factor in epitaxial CrN thin films, *J. Appl. Phys.* 136 (2024) 155301. <https://doi.org/10.1063/5.0226046>.
- [44] J.F. Serrano-Claumarchirant, B. Hamawandi, A.B. Ergül, A. Cantarero, C.M. Gómez, P. Priyadarshi, N. Neophytou, M.S. Toprak, Thermoelectric Inks and Power Factor Tunability in Hybrid Films through All Solution Process, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 14 (2022) 19295–19303. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c24392>.
- [45] J. Fast, H. Lundström, S. Dorsch, L. Samuelson, A. Burke, P. Samuelsson, H. Linke, Geometric Symmetry Breaking and Nonlinearity Can Increase Thermoelectric Power, *Phys. Rev. Lett.* 133 (2024) 116302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.116302>.
- [46] I. Petsagkourakis, S. Riera-Galindo, T. -P. Ruoko, X. Strakosas, E. Pavlopoulou, X. Liu, S. Braun, R. Kroon, N. Kim, S. Lienemann, V. Gueskine, G. Hadziioannou, M. Berggren, M. Fahlman, S. Fabiano, K. Tybrandt, X. Crispin, Improved Performance of Organic Thermoelectric Generators Through Interfacial Energetics, *Adv. Sci.* 10 (2023) 2206954. <https://doi.org/10.1002/advs.202206954>.
- [47] P. Moradifar, A.G. Nixon, T. Sharifi, T.B. Van Driel, P. Ajayan, D.J. Masiello, N. Alem, Nanoscale Mapping and Defect-Assisted Manipulation of Surface Plasmon Resonances in 2D Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> In-Plane Heterostructures, *Adv. Opt. Mater.* 10 (2022) 2101968. <https://doi.org/10.1002/adom.202101968>.
- [48] B. Yang, Z. Li, B. Zhou, T. Olofsson, A. Li, Enhanced effects of footwarmer by wearing sandals in winter office: A Swedish case study, *Indoor Built Environ.* 30 (2021) 875–885. <https://doi.org/10.1177/1420326X20913975>.

- [49] Z. Wang, H. Hölzel, K. Moth-Poulsen, Status and challenges for molecular solar thermal energy storage system based devices, *Chem. Soc. Rev.* 51 (2022) 7313–7326. <https://doi.org/10.1039/D1CS00890K>.
- [50] A. Dreos, K. Börjesson, Z. Wang, A. Roffey, Z. Norwood, D. Kushnir, K. Moth-Poulsen, Exploring the potential of a hybrid device combining solar water heating and molecular solar thermal energy storage, *Energy Environ. Sci.* 10 (2017) 728–734. <https://doi.org/10.1039/C6EE01952H>.
- [51] Z. Wang, H. Hölzel, L. Fernandez, A.S. Aslam, P. Baronas, J. Orrego-Hernández, S. Ghasemi, M. Campoy-Quiles, K. Moth-Poulsen, Hybrid solar energy device for simultaneous electric power generation and molecular solar thermal energy storage, *Joule* 8 (2024) 2607–2622. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.06.012>.
- [52] X. Zhang, X. He, L. Wu, A bilayer thermal-electric camouflage device suitable for a wide range of natural materials, *Compos. Struct.* 261 (2021) 113319. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113319>.
- [53] E. Kavak, C.N. Us, E. Yavuz, A. Kivrak, M. İçli Özkut, A Camouflage Material: p- and n-Type Dopable Furan Based Low Band Gap Electrochromic Polymer and Its EDOT Based Copolymer, *Electrochimica Acta* 182 (2015) 537–543. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.09.148>.
- [54] H. Yu, M. Qi, J. Wang, Y. Yin, Y. He, H. Meng, W. Huang, A feasible strategy for the fabrication of camouflage electrochromic fabric and unconventional devices, *Electrochem. Commun.* 102 (2019) 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2019.03.006>.
- [55] H. Fu, L. Zhang, Y. Dong, C. Zhang, W. Li, Recent advances in electrochromic materials and devices for camouflage applications, *Mater. Chem. Front.* 7 (2023) 2337–2358. <https://doi.org/10.1039/D3QM00121K>.
- [56] X. Zhang, Y. Yang, P. Xue, C. Valenzuela, Y. Chen, X. Yang, L. Wang, W. Feng, Three-Dimensional Electrochromic Soft Photonic Crystals Based on MXene-Integrated Blue Phase Liquid Crystals for Bioinspired Visible and Infrared Camouflage, *Angew. Chem. Int. Ed.* 61 (2022) e202211030. <https://doi.org/10.1002/anie.202211030>.
- [57] N.O. Laschuk, I.I. Ebralidze, E.B. Easton, O.V. Zenkina, Post-Synthetic Color Tuning of the Ultra-Effective and Highly Stable Surface-Confined Electrochromic Monolayer: Shades of Green for Camouflage Materials, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 13 (2021) 39573–39583. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c09863>.
- [58] H. Yu, S. Shao, L. Yan, H. Meng, Y. He, C. Yao, P. Xu, X. Zhang, W. Hu, W. Huang, Side-chain engineering of green color electrochromic polymer materials: toward adaptive camouflage application, *J. Mater. Chem. C* 4 (2016) 2269–2273. <https://doi.org/10.1039/C6TC00197A>.
- [59] L.M. Degenstein, D. Sameoto, J.D. Hogan, A. Asad, P.I. Dolez, Smart Textiles for Visible and IR Camouflage Application: State-of-the-Art and Microfabrication Path Forward, *Micromachines* 12 (2021) 773. <https://doi.org/10.3390/mi12070773>.
- [60] H. Ji, D. Liu, C. Zhang, H. Cheng, VO<sub>2</sub>/ZnS core-shell nanoparticle for the adaptive infrared camouflage application with modified color and enhanced oxidation resistance, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 176 (2018) 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.11.037>.
- [61] H. Ji, D. Liu, H. Cheng, C. Zhang, L. Yang, Vanadium dioxide nanopowders with tunable emissivity for adaptive infrared camouflage in both thermal atmospheric windows, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 175 (2018) 96–101. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.10.013>.
- [62] R. Hu, W. Xi, Y. Liu, K. Tang, J. Song, X. Luo, J. Wu, C.-W. Qiu, Thermal camouflaging metamaterials, *Mater. Today* 45 (2021) 120–141. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.11.013>.
- [63] X. Li, M. Luo, X. Jiang, S. Luo, Y. Yu, Z. Zhang, J. Yang, Color camouflage, solar absorption, and infrared camouflage based on phase-change material in the visible-infrared band, *Opt. Mater. Express* 12 (2022) 1251. <https://doi.org/10.1364/OME.450139>.

- [64] J. Chen, S. Zhang, Y. Wei, J. Yi, W. Pang, H. Zhang, Y. Fu, C. Li, W. Xia, C. Xiong, Flexible human-applicable infrared camouflage materials with temperature and emissivity tunability, *Compos. Sci. Technol.* 233 (2023) 109920. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2023.109920>.
- [65] Y. Qu, Q. Li, L. Cai, M. Pan, P. Ghosh, K. Du, M. Qiu, Thermal camouflage based on the phase-changing material GST, *Light Sci. Appl.* 7 (2018) 26. <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0038-5>.
- [66] S.K. Chamoli, W. Li, Visibly transparent multifunctional camouflage coating with efficient thermal management, *Opt. Lett.* 48 (2023) 4340. <https://doi.org/10.1364/OL.494539>.
- [67] L. Yuan, C. Huang, J. Liao, C. Ji, J. Huang, Y. Wang, X. Luo, A Dynamic Thermal Camouflage Metadevice with Microwave Scattering Reduction, *Adv. Sci.* 9 (2022) 2201054. <https://doi.org/10.1002/advs.202201054>.
- [68] S. Hong, S. Shin, R. Chen, An Adaptive and Wearable Thermal Camouflage Device, *Adv. Funct. Mater.* 30 (2020) 1909788. <https://doi.org/10.1002/adfm.201909788>.
- [69] T. Zhang, Y. Duan, J. Liu, H. Lei, J. Sun, H. Pang, L. Huang, Asymmetric electric field distribution enhanced hierarchical metamaterials for radar-infrared compatible camouflage, *J. Mater. Sci. Technol.* 146 (2023) 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.10.043>.
- [70] N. Lee, J. Lim, I. Chang, H.M. Bae, J. Nam, H.H. Cho, Flexible Assembled Metamaterials for Infrared and Microwave Camouflage, *Adv. Opt. Mater.* 10 (2022) 2200448. <https://doi.org/10.1002/adom.202200448>.
- [71] T. Han, X. Bai, J.T.L. Thong, B. Li, C. Qiu, Full Control and Manipulation of Heat Signatures: Cloaking, Camouflage and Thermal Metamaterials, *Adv. Mater.* 26 (2014) 1731–1734. <https://doi.org/10.1002/adma.201304448>.
- [72] T. Kim, J. Bae, N. Lee, H.H. Cho, Hierarchical Metamaterials for Multispectral Camouflage of Infrared and Microwaves, *Adv. Funct. Mater.* 29 (2019) 1807319. <https://doi.org/10.1002/adfm.201807319>.
- [73] X. Feng, M. Pu, F. Zhang, R. Pan, S. Wang, J. Gong, R. Zhang, Y. Guo, X. Li, X. Ma, X. Luo, Large-Area Low-Cost Multiscale-Hierarchical Metasurfaces for Multispectral Compatible Camouflage of Dual-Band Lasers, Infrared and Microwave, *Adv. Funct. Mater.* 32 (2022) 2205547. <https://doi.org/10.1002/adfm.202205547>.
- [74] X. Wang, Y. Tang, Y. Wang, L. Ke, X. Ye, X. Huang, B. Shi, Leather enabled multifunctional thermal camouflage armor, *Chem. Eng. Sci.* 196 (2019) 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.12.005>.
- [75] X. Chen, Y. Li, S. Cheng, K. Wu, Q. Wang, L. Liu, F. Yang, A. Xie, H. Pang, C. Yu, Liquid Metal-MXene-Based Hierarchical Aerogel with Radar-Infrared Compatible Camouflage, *Adv. Funct. Mater.* 34 (2024) 2308274. <https://doi.org/10.1002/adfm.202308274>.
- [76] Yi. Geng, X. Han, J. Wang, H. Zhang, J. Wang, Y. Li, R. Wang, L. Shi, T. Gao, Metamaterial-Based Radar-Infrared Camouflage Material for Building Insulation: Design and Performance Analysis, *J. Build. Eng.* (2024) 111088. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111088>.
- [77] N. Lee, T. Kim, J.-S. Lim, I. Chang, H.H. Cho, Metamaterial-Selective Emitter for Maximizing Infrared Camouflage Performance with Energy Dissipation, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 11 (2019) 21250–21257. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b04478>.
- [78] Y. Gong, H. Wang, J. Luo, J. Chen, Z. Qu, Research Progress of Bioinspired Structural Color in Camouflage, *Materials* 17 (2024) 2564. <https://doi.org/10.3390/ma17112564>.
- [79] Y. Li, X. Bai, T. Yang, H. Luo, C.-W. Qiu, Structured thermal surface for radiative camouflage, *Nat. Commun.* 9 (2018) 273. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02678-8>.
- [80] N. Lee, J.-S. Lim, I. Chang, D. Lee, H.H. Cho, Transparent Metamaterials for Multispectral Camouflage with Thermal Management, *Int. J. Heat Mass Transf.* 173 (2021) 121173. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121173>.

- [81] W. Xi, Y.-J. Lee, S. Yu, Z. Chen, J. Shiomi, S.-K. Kim, R. Hu, Ultrahigh-efficient material informatics inverse design of thermal metamaterials for visible-infrared-compatible camouflage, *Nat. Commun.* 14 (2023) 4694. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40350-6>.
- [82] D. Xie, M. Zu, M. Li, D. Liu, Z. Wang, Q. Li, H. Cheng, A Hyperspectral Camouflage Colorant Inspired by Natural Leaves, *Adv. Mater.* 35 (2023) 2302973. <https://doi.org/10.1002/adma.202302973>.
- [83] C. Yu, Y. Li, X. Zhang, X. Huang, V. Malyarchuk, S. Wang, Y. Shi, L. Gao, Y. Su, Y. Zhang, H. Xu, R.T. Hanlon, Y. Huang, J.A. Rogers, Adaptive optoelectronic camouflage systems with designs inspired by cephalopod skins, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111 (2014) 12998–13003. <https://doi.org/10.1073/pnas.1410494111>.
- [84] J. Yang, X. Zhang, X. Zhang, L. Wang, W. Feng, Q. Li, Beyond the Visible: Bioinspired Infrared Adaptive Materials, *Adv. Mater.* 33 (2021) 2004754. <https://doi.org/10.1002/adma.202004754>.
- [85] Y. Lin, L. Ren, X. Yang, H. Yuan, Design and Application of Bionic Camouflage Materials Simulating Spectral Reflection Characteristics of Plants: A Review, *Appl. Sci.* 14 (2024) 4404. <https://doi.org/10.3390/app14114404>.
- [86] Q. Lu, M. Li, A. Tian, S. Fu, Green Plant Leaf-inspired Smart Camouflage Fabrics for Visible Light and Near-infrared Stealth, *J. Bionic Eng.* 19 (2022) 788–798. <https://doi.org/10.1007/s42235-022-00156-6>.
- [87] X. Bu, H. Bai, Recent Progress of Bio-inspired Camouflage Materials: From Visible to Infrared Range, *Chem. Res. Chin. Univ.* 39 (2023) 19–29. <https://doi.org/10.1007/s40242-022-2170-2>.
- [88] Y. Qiao, Z. Meng, P. Wang, D. Yan, Research Progress of Bionic Adaptive Camouflage Materials, *Front. Mater.* 8 (2021) 637664. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.637664>.
- [89] M. Zhang, S. Li, Controllable liquid colour-changing lenses with microfluidic channels for vision protection, camouflage and optical filtering based on soft lithography fabrication, *SpringerPlus* 5 (2016) 580. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2231-4>.
- [90] C. Xu, C. Liu, G. Fang, C. Zhu, Q. Qian, C. Li, R. Zhu, G. Xu, J. Yan, Y. Zhang, Design, preparation and performance evaluation of core unit in multispectral camouflage coating, *Infrared Phys. Technol.* 121 (2022) 104013. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.104013>.
- [91] Y. Su, X. Zhao, Z. Feng, Low infrared emissivity composite materials for multi-band camouflage, *Text. Res. J.* 93 (2023) 3128–3143. <https://doi.org/10.1177/00405175231153181>.
- [92] L. Wang, S. Zhang, J. Dong, L. Ma, C. Zheng, W. Zhang, L. Liu, Multi-band infrared camouflage compatible with radiative cooling and visible colors via a simple multilayer film structure, *Opt. Mater. Express* 13 (2023) 2746. <https://doi.org/10.1364/OME.497654>.
- [93] J.-S. Lim, N. Lee, T. Kim, I. Chang, J. Nam, H.H. Cho, Multiresonant Selective Emitter with Enhanced Thermal Management for Infrared Camouflage, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16 (2024) 15416–15425. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c15504>.
- [94] D. Ding, X. He, S. Liang, W. Wei, S. Ding, Porous Nanostructured Composite Film for Visible-to-Infrared Camouflage with Thermal Management, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 14 (2022) 24690–24696. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c03509>.
- [95] Md.A. Hossain, Spectral simulation and materials design for camouflage textiles coloration against materials of multidimensional combat backgrounds in visible and near infrared spectrums, *MRS Commun.* 13 (2023) 306–319. <https://doi.org/10.1557/s43579-023-00344-3>.
- [96] T. Lim, S.-M. Jeong, K. Seo, J.H. Pak, Y.K. Choi, S. Ju, Development of fiber-based active thermal infrared camouflage textile, *Appl. Mater. Today* 20 (2020) 100624. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100624>.

- [97] Y. Liu, H. Zuo, W. Xi, R. Hu, X. Luo, Flexible Janus Functional Film for Adaptive Thermal Camouflage, *Adv. Mater. Technol.* 7 (2022) 2100821. <https://doi.org/10.1002/admt.202100821>.
- [98] M. Li, D. Liu, H. Cheng, L. Peng, M. Zu, Manipulating metals for adaptive thermal camouflage, *Sci. Adv.* 6 (2020) eaba3494. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba3494>.
- [99] X. Fan, S. Li, W. Zhang, W. Xu, Recent progress in two-dimensional nanomaterials of graphene and MXenes for thermal camouflage, *Ceram. Int.* 49 (2023) 5559–5572. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.12.034>.
- [100] L. Sansone, F. Loffredo, F. Cilento, R. Miscioscia, A. Martone, N. Barrella, B. Paulillo, A. Bassano, F. Villani, M. Giordano, Recent Advances in Graphene Adaptive Thermal Camouflage Devices, *Nanomaterials* 14 (2024) 1394. <https://doi.org/10.3390/nano14171394>.
- [101] Y. Su, B. Yu, X. Zhao, Research status and development of infrared camouflage textile materials, *Text. Res. J.* 93 (2023) 5047–5082. <https://doi.org/10.1177/00405175231170323>.
- [102] X. Lv, L. Yuan, C. Rao, X. Wu, X. Qing, X. Weng, Structure and near-infrared spectral properties of mesoporous silica for hyperspectral camouflage materials, *Infrared Phys. Technol.* 129 (2023) 104558. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2023.104558>.
- [103] T. Wang, J. He, J. Zhou, X. Ding, J. Zhao, S. Wu, Y. Guo, Electromagnetic wave absorption and infrared camouflage of ordered mesoporous carbon–alumina nanocomposites, *Microporous Mesoporous Mater.* 134 (2010) 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2010.05.007>.
- [104] H. Chu, Z. Zhang, Y. Liu, J. Leng, Silver particles modified carbon nanotube paper/glassfiber reinforced polymer composite material for high temperature infrared stealth camouflage, *Carbon* 98 (2016) 557–566. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.11.036>.
- [105] L. Li, M. Shi, X. Liu, X. Jin, Y. Cao, Y. Yang, W. Wang, J. Wang, Ultrathin Titanium Carbide (MXene) Films for High-Temperature Thermal Camouflage, *Adv. Funct. Mater.* 31 (2021) 2101381. <https://doi.org/10.1002/adfm.202101381>.
- [106] M. Anowar Hossain, Simulation of chromatic and achromatic assessments for camouflage textiles and combat background, *J. Def. Model. Simul. Appl. Methodol. Technol.* 20 (2023) 317–332. <https://doi.org/10.1177/15485129211067759>.
- [107] K. Andersson, On the Military Utility of Spectral Design in Signature Management: a Systems Approach, Doctoral Thesis, National Defence University of Finland, 2018.
- [108] T. Hallberg, Optical measurement methods in spectroscopy and light scattering, Swedish Defense Research Agency, FOI, 2020.
- [109] L.H. Karlsson, User Manual Spectrometer Bruker for measurements of reflectance and transmittance in IR, Swedish Defense Research Agency, 2019.
- [110] S. Du, S.N. Stechmann, Element learning: a systematic approach of accelerating finite element-type methods via machine learning, with applications to radiative transfer, (2023). <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2308.02467>.
- [111] F. Ghavamian, Accelerating finite element analysis using machine learning, Delft University of Technology, 2021. <https://doi.org/10.4233/UUID:015BBF35-5E29-4630-B466-1A29D4C5BFB3>.
- [112] P.B. Jørgensen, A. Bhowmik, DeepDFT: Neural Message Passing Network for Accurate Charge Density Prediction, (2020). <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2011.03346>.
- [113] J. Workman Jr., AI-Based Neural Networks Revolutionize Infrared Spectra Analysis, <https://www.spectroscopyonline.com/view/ai-Based-Neural-Netw.-Revolutionize-Infrared-Spectra-Anal.2024> (n.d.).
- [114] S. Medghalchi, J. Kortmann, S.-H. Lee, E. Karimi, U. Kerzel, S. Korte-Kerzel, Automated segmentation of large image datasets using artificial intelligence for microstructure characterisation and damage analysis, *Mater. Des.* 243 (2024) 113031. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113031>.

- [115] S.M.K. Al-Zaidawi, S. Bosse, A Pore Classification System for the Detection of Additive Manufacturing Defects Combining Machine Learning and Numerical Image Analysis, in: 10th Int. Electron. Conf. Sens. Appl., MDPI, 2023: p. 122. <https://doi.org/10.3390/ecsa-10-16024>.
- [116] P.O. Andersson, E. Dalberg, C. DURING, P. Hemström, L.H. Karlsson, C. Lopes, Hydroorganogelers - En avskanning av forskningsfronten, 2022.
- [117] L.H. Karlsson, E. Dalberg, P. Andersson, M. Dalenbring, O. Parmhed, G. Kindvall, Extremt värmeståliga material - Avskanning av forskningsfronten, 2024.
- [118] L.H. Karlsson, G. Kindvall, E. Dalberg, Metodbeskrivning: Avskanning av forskningsfronten inom extremt värmeståliga material, n.d.
- [119] J. Silander, P. Rejmstad, T. Hallberg, C. Åkerlind, Nanocellulose-based films for camouflage applications, in: K. Stein, R. Schleijsen (Eds.), Target Backgr. Signat. IX, SPIE, Amsterdam, Netherlands, 2023: p. 8. <https://doi.org/10.1117/12.2684079>.
- [120] E. Örtenberg, P. Rejmstad, C. Åkerlind, Optical properties of water absorbing textiles for camouflage, in: K. Stein, R. Schleijsen (Eds.), Target Backgr. Signat. IX, SPIE, Amsterdam, Netherlands, 2023: p. 10. <https://doi.org/10.1117/12.2683969>.
- [121] M. Håkansson, T. Hallberg, E. Örtenberg, Low-emissive paint with silver nanowires, in: K. Stein, R. Schleijsen (Eds.), Target Backgr. Signat. IX, SPIE, Amsterdam, Netherlands, 2023: p. 12. <https://doi.org/10.1117/12.2684997>.
- [122] M. Forsgren, Studie av högkvalitativ grafen i epoxy och radarabsorption i X-band, Swedish Defense Research Agency, FOI, 2025.
- [123] S. Karlsson, A. Bergman, C. Gullström, T. Hallberg, S. Jönsson, H. Kariis, L.H. Karlsson, M. Persson, P. Rejmstad, J. Silander, A. Tengbom, M. Unosson, Material och Produktionsteknik - Verksamhet 2024, 2025.
- [124] J. Fagerström, T. Hallberg, C. Åkerlind, Resultat och lärdomar från EDA-projektet ALOCAS "Advanced Low Observable Coatings and Structures," Swedish Defense Research Agency, FOI, 2024.
- [125] L.H. Karlsson, Färdplan: 2D-material för optisk signaturanpassning, Swedish Defense Research Agency, FOI, 2023.
- [126] Y. Dong, A. Bazrafshan, A. Pokutta, F. Sulejmani, W. Sun, J.D. Combs, K.C. Clarke, K. Salaita, Chameleon-Inspired Strain-Accommodating Smart Skin, ACS Nano 13 (2019) 9918–9926. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b04231>.
- [127] Adaptive coloration in young cuttlefish (*Sepia officinalis* L.): the morphology and development of body patterns and their relation to behaviour, Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci. 320 (1988) 437–487. <https://doi.org/10.1098/rstb.1988.0087>.
- [128] H.M. Kariis, C. Åkerlind, Overview of the adaptive camouflage for the soldier II (ACAMSII) project, in: K.U. Stein, R. Schleijsen (Eds.), Target Backgr. Signat. VII, SPIE, Online Only, Spain, 2021: p. 11. <https://doi.org/10.1117/12.2599763>.
- [129] H.M. Kariis, A. Barbosa, A. Barros, P. Ferreira, C. Gullström, M.A. Hogervorst, R. Jonsson, C. Millet-Ribot, V. Rubeziene, G. Santos, A. Schwarz, C. Senzier, S. Varnaite-Žuravliova, M.E. Winkelmann, C. Åkerlind, Demonstration of adaptive camouflage for the soldier, in: K. Stein, R. Schleijsen (Eds.), Target Backgr. Signat. VIII, SPIE, Berlin, Germany, 2022: p. 1. <https://doi.org/10.1117/12.2639919>.
- [130] R.D.V. Fernandes, A. Pranovich, S. Valyukh, A. Zille, T. Hallberg, K. Järrendahl, Iridescence Mimicking in Fabrics: A Ultraviolet/Visible Spectroscopy Study, Biomimetics 9 (2024) 71. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9020071>.
- [131] O. Eskilson, E. Zattarin, J. Silander, T. Hallberg, C. Åkerlind, R. Selegård, K. Järrendahl, D. Aili, Self-Assembly of Soft and Conformable Broadband Absorbing Nanocellulose-Gold Nanoparticle Composites, ACS Appl. Mater. Interfaces 16 (2024) 52894–52901. <https://doi.org/10.1021/acsmi.4c10244>.
- [132] T.S. Eriksson, E.M. Lushiku, C.G. Granqvist, Materials for radiative cooling to low temperature, Sol. Energy Mater. 11 (1984) 149–161. [https://doi.org/10.1016/0165-1633\(84\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0165-1633(84)90067-4).
- [133] S. Catalanotti, V. Cuomo, G. Piro, D. Ruggi, V. Silvestrini, G. Troise, The radiative cooling of selective surfaces, Sol. Energy 17 (1975) 83–89. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(75\)90062-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(75)90062-6).

- [134] A.P. Raman, M.A. Anoma, L. Zhu, E. Rephaeli, S. Fan, Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight, *Nature* 515 (2014) 540–544. <https://doi.org/10.1038/nature13883>.
- [135] T. Li, Y. Zhai, S. He, W. Gan, Z. Wei, M. Heidarinejad, D. Dalgo, R. Mi, X. Zhao, J. Song, J. Dai, C. Chen, A. Aili, A. Vellore, A. Martini, R. Yang, J. Srebric, X. Yin, L. Hu, A radiative cooling structural material, *Science* 364 (2019) 760–763. <https://doi.org/10.1126/science.aau9101>.
- [136] F. Ram, M. Höglund, M. Liao, T. Hallberg, M.P. Jonsson, L.A. Berglund, R. Shanker, Transparent Wood for Passive Radiative Cooling of Solar Absorbers, *Nano Lett.* (2025) [acs.nanolett.5c02994](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5c02994). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5c02994>.
- [137] S. Gamage, E.S.H. Kang, C. Åkerlind, S. Sardar, J. Edberg, H. Kariis, T. Ederth, M. Berggren, M.P. Jonsson, Transparent nanocellulose metamaterial enables controlled optical diffusion and radiative cooling, *J. Mater. Chem. C* 8 (2020) 11687–11694. <https://doi.org/10.1039/D0TC01226B>.
- [138] S. Gamage, D. Banerjee, Md.M. Alam, T. Hallberg, C. Åkerlind, A. Sultana, R. Shanker, M. Berggren, X. Crispin, H. Kariis, D. Zhao, M.P. Jonsson, Reflective and transparent cellulose-based passive radiative coolers, *Cellulose* 28 (2021) 9383–9393. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04112-1>.
- [139] M. Liao, D. Banerjee, T. Hallberg, C. Åkerlind, M.M. Alam, Q. Zhang, H. Kariis, D. Zhao, M.P. Jonsson, Cellulose-Based Radiative Cooling and Solar Heating Powers Ionic Thermoelectrics, *Adv. Sci.* 10 (2023) 2206510. <https://doi.org/10.1002/advs.202206510>.
- [140] R. Shanker, P. Ravi Anusuyadevi, S. Gamage, T. Hallberg, H. Kariis, D. Banerjee, A.J. Svagan, M.P. Jonsson, Structurally Colored Cellulose Nanocrystal Films as Transreflective Radiative Coolers, *ACS Nano* 16 (2022) 10156–10162. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.1c10959>.
- [141] H.H. Kim, E. Im, S. Lee, Colloidal Photonic Assemblies for Colorful Radiative Cooling, *Langmuir* 36 (2020) 6589–6596. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c00051>.
- [142] B. Schmuck, G. Greco, T.B. Pessatti, S. Sonavane, V. Langwallner, T. Arndt, A. Rising, Strategies for Making High-Performance Artificial Spider Silk Fibers, *Adv. Funct. Mater.* 34 (2024) 2305040. <https://doi.org/10.1002/adfm.202305040>.
- [143] A. Rising, H. Nimmervoll, S. Grip, A. Fernandez-Arias, E. Storckenfeldt, D.P. Knight, F. Vollrath, W. Engström, Spider Silk Proteins – Mechanical Property and Gene Sequence, *Zoolog. Sci.* 22 (2005) 273–281. <https://doi.org/10.2108/zsj.22.273>.
- [144] H. Kariis, M. Unosson, M. Persson, L.H. Karlsson, M. Tynnhammar, T. Hallberg, C. Åkerlind, Material- och produktionsteknik, verksamhet 2023, Swedish Defense Research Agency, FOI, 2023.
- [145] D.F. Reding, A.M. Blanco, A.D. Lucia, C.L.A. Regan, D. Bayliss, *Science & Technology Trends 2023-2043 - Across the Physical, Biological, and Information Domains, Volume 2: Analysis*, NATO Science & Technology Organization, Brussels, Belgium, 2023.



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)