



Färdplan Tillverkning 2020

Johan Ek Weis och Sophie Charpentier

Chalmers Industriteknik

juni 2020

Med stöd från

VINNOVA
Sveriges innovationsmyndighet

 **Energimyndigheten**

FORMAS

Strategiska
innovations-
program

Sammanfattning

Utvecklingen av grafenindustrin i Sverige har gått snabbt under de senaste sex åren, vilket är så länge som SIO Grafen funnits. Stora steg har tagits för att etablera grafen inom industrin där de tydligaste exemplen är att produktionskapaciteten av grafen år 2020 överstiger tio ton/år i Sverige och att över 140 organisationer har arbetat i grafenprojekt. Men för att vara ett av världens tio främsta länder finns det fortfarande mycket som behöver falla på plats.

Detta är SIO Grafens femte färdplan och behandlar styrkeområde tillverkning, vilket inkluderar materialtillverkning, karakterisering, processutveckling, testbäddar och produktionsutveckling av grafen i Sverige. Tidsperspektivet omfattar perioden 2020-2030 för färdplanen som helhet, med konkreta mål för år 2025 och 2030 samt aktiviteter för att nå dessa. Nuläget beskrivs i färdplanen med hänvisningar till ytterligare källor för djupare förståelse.

Den genomgående visionen för den här färdplanen är att grafen ska vara ett etablerat material för svenska produktproducenter, först i mindre skala år 2025 för att sedan breddas till fler områden och utökas år 2030. Några av de identifierade områdena för att nå detta är:

- Fler nya tillverkare och materialförädlare av grafen samt etablering av redan existerande. Detta inkluderar beredskap för uppskalning
- Grafenutveckling i svenska testbäddar
- Etablering av karakteriseringsmetoder och standardisering, inklusive guider
- Ökad förståelse kring vilken typ av grafen som är lämplig för specifika tillämpningar
- Framtagning av halvfabrikat, till exempel masterbatchar
- Prediktiv modellering och simulering
- Utökad kommunikation, inklusive till exempel "success stories" och introduktionsmaterial, ännu fler aktörer engagerade
- Tydligare information om eventuella hälsorisker och återvinning
- Bra med bredd på grafenutvecklingen men även behov av fokus

Grafen har stor potential att förbättra olika material inom många, helt skilda områden. Detta kan både ses som en styrka och en svaghet då möjligheterna är många, samtidigt som utvecklingen saknar ett naturligt fokus. Denna färdplans fokus på styrkeområde tillverkning inom SIO Grafen (vilket inkluderar materialtillverkning, karakterisering, processutveckling, testbäddar och produktionsutveckling) lägger dock grunden till alla dessa möjligheter.

Innehåll

Sammanfattning.....	1
Innehåll.....	2
Introduktion	4
Bakgrund	5
Vad är känt och vilka frågor kvarstår?.....	6
Vägen framåt - mål och aktiviteter	7
Tillverkning av grafen i Sverige	7
Datablad, karakterisering och standardisering.....	8
Kompositer	8
Testbäddar och pilotanläggningar.....	9
Prediktiv modellering och simulering	9
Kommunikation	10
Grafen i industrin	10
Mål.....	12
Mål för utveckling av grafentillverkning och tillhörande processer	12
Mål för utveckling av karakterisering och standardisering av grafen.....	13
Mål för användning av testbäddar eller pilotanläggningar	13
Mål för utveckling av grafenindustrin.....	13
Aktiviteter	14
Nuläge – hur ser grafenområdet ut i dag?.....	18
Översikt över typer och tillverkningsmetoder av grafen	18
Flagor	19
Filmer.....	21
Övriga tillverkningsmetoder och typer av grafen	23
Funktionalisering av grafen	23
Andra 2D-material	23
Svenska leverantörer	24
Viktiga internationella leverantörer	25
Tillämpningar	26
Karakterisering och standardisering.....	29
Karakterisering	29
Standardisering.....	30

Större investeringar i forskning och utveckling med fokus på grafen	32
Svenska testbäddar och pilotanläggningar	34
Grafen och hälsa.....	36
Bilagor.....	37
Internationella centra med fokus på grafen	37
Standarder	39
Publicerade standarder	39
Standarder under utveckling med förutsagt publiceringsår enligt IEC:	39

Introduktion

Grafenutvecklingen har kommit långt för ett så pass ungt material, både internationellt och i Sverige. Forskningen på grafen tog fart för drygt 15 år sedan efter publikationen¹ (2004) som senare ledde till Nobelpriset² (2010). Det tog dock ytterligare några år innan grafen kunde tillverkas med metoder som kunde skalas upp till industriella processer (flagor 2008³ och filmer 2009⁴). Utvecklingen har fortsatt och grafen kan nu tillverkas i stor skala (flagor i tusentals ton per år och filmer i tusentals kvadratmeter per år, läs mer om detta i kapitlet "Nuläge – hur ser grafenområdet ut i dag?"). Dessutom är kvalitén nu betydligt högre än för drygt tio år sedan när tillverkningsprocesserna var nya.

Grafen är inte bara ett material. Snarare är det ett samlingsnamn för en familj av liknande - men olika - material. I denna rapport behandlas tvådimensionella material, så kallade 2D-material, som består av upp till tio atomlager. Därmed är till exempel grafit, kolnanorör, diamantliknande kol och nanolera exkluderade. Grafen delas ofta in i flagor och filmer. Dessa tillverkas på olika sätt och har olika tillämpningar, vilket diskuteras i kapitlet om nuläget. Utöver grafen finns många andra 2D-material. Det forskas mycket på dessa inom akademien men industriellt ligger utvecklingen efter i förhållande till grafen. Fokus i denna färdplan ligger därmed på grafen, men även andra 2D-material är inkluderade.

Färdplanen är för SIO Grafens styrkeområde tillverkning. Detta inkluderar:

- Materialtillverkning
- Karakterisering
- Processutveckling
- Testbäddar
- Produktionsutveckling av grafen

Den här färdplanen stolpar först upp en grund över vad som är känt inom grafennätverket och vilka frågor som återstår med fokus på styrkeområde tillämpning. Färdplanen fortsätter sedan med att diskutera vägen framåt och sätta upp mål för styrkeområdet för år 2025 och 2030 samt diskuterar aktiviteter för att nå dessa.

¹ Novoselov, K. S. *et al.* Science 306, 666–669 (2004).

² <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/9434-pressmeddelande-nobelpriset-i-fysik-2010/>

³ Hernandez, Y. *et al.* Nat. Nanotechnol. 2008, 3, 563–568

⁴ Li, X. Cai, W. and An, J. *et al.* Science 2009; 324: 1312–4.

Därefter beskrivs nuläget för styrkeområde tillverkning. Fokus ligger på Sverige, men även vad som är känt internationellt tas upp i diskussionen kring nuläget. Detta inkluderar en översikt över olika typer och tillverkningsmetoder av grafen och andra 2D-material samt materialens leverantörer. Karakterisering och standardisering har utpekats som viktiga segment för fortsatt utveckling av grafenområdet både i Sverige och internationellt och statusen diskuteras här. Några internationella satsningar och centra med fokus på grafen tas upp samt en sammanställning över relevanta svenska testbäddar och pilotanläggningar.

Hälsa- och miljöaspekter kring grafen är väldigt viktiga för hela grafenutvecklingen, inklusive tillverkningsområdet. Dessa aspekter ligger dock under styrkeområde bioteknik och kommer därmed inte att fokuseras på inom ramen för denna färdplan. Eftersom dessa aspekter är centrala för tillverkningen kommer de ändå diskuteras i korthet.

Den här färdplanen har tagits fram av Chalmers Industriteknik på uppdrag av SIO Grafen med stöd av en referensgrupp. Referensgruppen bestod av Sven Forsberg, 2D fab; Thomas Gillgren, BillerudKorsnäs; Anette Munch-Elmér, Polykemi och Mamoun Taher, Graphmatech. Även övriga aktörer inom SIO Grafen har haft möjlighet att påverka innehållet i färdplanen under en online-workshop. Det har även givits möjligheter till öppen konsultation genom SIO Grafens nyhetsbrev.

Bakgrund

SIO Grafen är ett nationellt strategiskt innovationsprogram som stärker gränsöverskridande samverkan mellan forskningsleverantörer och företag inom grafenområdet. SIO Grafens vision för år 2030 är:

Sverige är ett av världens tio främsta länder på att använda grafen för att säkerställa industriellt ledarskap.

Effektmålen för programmet är:

- Etablera grafen som ett svenskt industriellt styrkeområde
- Stärka samverkan och värdekedjor tvärs sektorer
- Stimulera svensk grafentillverkning
- Grafen stödjer omställning till hållbart samhälle

SIO Grafen har sex styrkeområden och har tagit fram färdplaner inom fyra av dessa. Det finns andra internationella färdplaner om grafen, men dessa är de enda som fokuserar på ett svenskt perspektiv. SIO Grafens färdplaner inom [kompositer och](#)

[ytbeläggningar](#)⁵ publicerades under 2017, medan [elektronik](#)⁶ publicerades under 2019 och [energi](#)⁷ under 2020. Detta är således den femte färdplanen inom SIO Grafen.

SIO Grafen drivs med stöd från myndigheterna Vinnova, Formas och Energimyndigheten.

Vad är känt och vilka frågor kvarstår?

Det finns goda förutsättningar för grafen och andra 2D-material att ta sig ut på marknaden både i Sverige och globalt. Detta kommer diskuteras ytterligare i kapitlet om nuläget. Men det finns också utmaningar som behöver lösas för att faktiskt komma dit.

Vad är känt idag?

- Många tillverkningsmetoder
- Som ger många olika typer av grafen
- Det går att tillverka grafen i stor skala. Tiofalls ton i Sverige, tusentals ton globalt.
- Grafen kan förbättra existerande material
- Grafen kan möjliggöra nya tillämpningar

Vilka frågor kvarstår?

- Vilket grafen som passar i vilka tillämpningar
- Hur grafen bäst inkorporeras i andra material. Det finns bättre kunskap om vissa material än andra
- Reproducerbarhet i grafentillverkningen
- Karakterisering
- Standardisering
- Överföring av CVD grafen / storskalig produktion direkt på tillämpningssubstratet (ofta Si/SiO₂ inom elektronik)
- Hälsa under tillverkning och användning, återvinning, miljöpåverkan
- Utvecklingen av övriga 2D-material ligger efter grafen.

⁵ L. Dahlen, H. Rosén, S.J. Savage, S. Charpentier och S. Sörensen. Grafen: En svensk roadmap Kompositier & Ytbeläggningar (2017)

⁶ H. Zirath, J. Li, T. Nilsson, M. Sandberg, J. Hammersberg och C. Dahl. Graphene Roadmap: Electronics (2019)

⁷ I. Nyström och M. Jacobsson, Färdplan Energi Grafen för energitillämpningar i Sverige 2020-2030 (2020)

Vägen framåt - mål och aktiviteter

Utvecklingen av grafenområdet har gått väldigt snabbt för ett så ungt material, men det finns också mycket mer som behöver utarbetas för att området ska kunna nå sin fulla potential.

Tillverkning av grafen i Sverige

Det finns i dag sju leverantörer av grafen i Sverige. För fortsatt utveckling av en svensk grafenindustri kommer det på sikt behövas både nya aktörer och att några av dem växer sig större. Detta kommer både säkra tillgången till större volymer av grafen och utveckling av nya grafentyper. På sikt ser vi att det kommer bli färre leverantörer då några kan komma att gå ihop eller någon dominerar marknaden, vilket är ett vanligt fenomen inom nya områden. Vi bedömer dock att det fortfarande finns utrymme för fler leverantörer på den svenska marknaden som kan hitta nya material och lösningar innan utvecklingen går mot att ett fåtal aktörer dominerar.

Det finns i dag ingen tillverkare som använder kemisk ångdeponering (CVD) för att tillverka grafen i Sverige, undantaget de som producerar i liten skala på universitet. Vi ser inte nödvändigtvis detta som ett bekymmer. Eftersom priset på CVD-grafen är högt kommer en potentiell användare med stor sannolikhet att investera i utrustning för att själv producera materialet hellre än att köpa in CVD-grafen i stor skala i Sverige. Det vore dock fördelaktigt om det gick att få tag på svenskt CVD-grafen i mindre skala för forskning och utveckling. I nuläget hänvisas intresserade av CVD-grafen för utveckling mestadels till etablerade tillverkare i Europa.

En av de internationellt erkänt bästa tillverkarna av epitaxiell grafen är ett svenskt företag, Graphenic. Den här typen av grafen har hög kvalitet, men kan inte tillverkas i riktigt stor skala. Detta passar generellt svensk industri som ofta satsar på mer högkvalitativa produkter då det ofta är möjligt att tillverka enklare produkter billigare i andra länder. Här finns alltså en nischmarknad som Sverige skulle kunna utnyttja. En möjlig utmaning är dock att de flesta företag som bäst skulle kunna utnyttja materialet i dagsläget inte finns i Sverige.

Två av de svenska leverantörerna (2D fab och Graphmatech) skalar upp produktionskapaciteten av flagor till tio ton per år. Vid tillverkning över ett ton per år krävs en REACH-registrering, vilket inga svenska företag än har gjort. Läs mer om REACH i slutet av detta dokument (i kapitlet "Grafen och hälsa") och i länkarna där. Än så länge är efterfrågan dock betydligt lägre vilket även innebär att tillverkningen är i betydligt mindre volymer. Ett intressant alternativ är därmed att förbereda för att snabbt kunna skala upp produktionen, istället för att direkt skala upp kapaciteten. Detta kräver dock större involvering av tillverkare av utrustning och maskiner för grafentillverkning.

Datablad, karakterisering och standardisering

En begränsande faktor för företag som vill implementera grafen i sina produkter är att det inte finns bra datablad för materialet grafen. Det finns inga etablerade karakteriseringsmetoder. Istället använder leverantörer av grafen olika metoder, vilket gör det svårt att jämföra olika material. Dessutom är variationen för databladens korrekthet stor eftersom karakteriseringsmetoderna inte är helt utvecklade med avseende på grafen. När det inte går att jämföra material på ett objektivt sätt blir det också väldigt svårt att anlita olika leverantörer av samma material, vilket är ett krav inom många industrier.

De egenskaper hos grafen som är intressanta varierar för olika tillämpningar, vilket samtidigt gör det svårt för grafenleverantörerna att veta vilka egenskaper och metoder de ska fokusera på. Utvecklade och standardiserade mätmetoder samt utökad terminologi behövs därför för att ta fram bättre datablad. Det behövs således också aktörer inom Sverige som kan utföra karakteriseringen på ett korrekt sätt. Vi ser dock inte att det behövs ett dedikerat analyslabb för grafen dit användare kan vända sig för att få grafenmaterial verifierat. Visionen är istället att med etablerade standarder för terminologi och karakterisering ligger ansvaret att leverera kvalitetssäkrat material på tillverkarna av grafen och kräver inte att användarna verifierar köpt material.

Kompositer

De flesta av de grafenbaserade produkter som finns på den globala marknaden idag är olika sorters kompositer, främst polymerkompositer. Grafenet används för att förbättra flera olika egenskaper hos materialen. Grafen har till exempel gjort kompositer styvare, mer nötningsbeständiga, gett lägre friktion mot andra material, förhöjd elektrisk eller termisk ledningsförmåga, möjliggjort lättare produkter med bibehållna mekaniska egenskaper och ökat produktionsstakten. Det finns dock fortfarande potential för ännu bättre prestanda. Det krävs främst mer utveckling kring förståelsen av kemin i kopplingen mellan grafenet och matrisen samt reologin i tillverkningsprocessen, detta inkluderar förståelsen kring vilken typ av grafen som passar specifika tillämpningar.

Kompositer utan grafen används i en väldigt stor mängd produkter idag. Tillverkarna av dessa är dock oftast ovana vid att själva tillsätta pulver i tillverkningsprocessen. Framställning av masterbatcher med grafen i olika polymerer skulle därmed kunna öppna upp möjligheten för många nya tillämpningar och produkter. I omställningen till ett mer hållbart samhälle skulle grafen till exempel kunna bidra med att både minska vikten och öka livslängden på många produkter. För detta krävs dock mer kunskap, där till exempel best practice studier skulle kunna ta ett stort steg.

Internationellt arbetas det mycket på att utveckla nya polymerkompositer med grafen. En av anledningarna kan vara att området länge pekats ut som ett område med relativt kort väg till färdiga produkter. Det är därmed möjligt att Sverige riskerar att halka efter i den internationella utvecklingen av nästa generations polymerkompositer om inte satsningen på området ökar.

Det internationella fokuset på metallkompositer med grafen är däremot betydligt mindre. Svensk metallindustri (främst stål) har traditionellt sett varit stark under många år. Det sker en del utveckling av metallkompositer med grafen i Sverige, men med ett ökat fokus skulle svensk industri ha möjligheten att leda utvecklingen. Grafenet kan till exempel förbättra de mekaniska egenskaperna hos metallen så att en mindre mängd metall kan användas med samma prestanda. Detta leder i sin tur både till minskad tillverkningskostnad och lägre transportkostnader.

Additiv tillverkning eller 3D-printning är ett område under snabb utveckling som ger nya möjligheter till hur material tillverkas och designas. Här skulle grafen till exempel kunna användas för att förbättra de mekaniska, elektriska och termiska egenskaperna eller göra dem multifunktionella. Det är en utmaning att blanda in grafen i metaller genom att smälta och forma metallen. Ett intressant alternativ är att ytbelägga små metallpartiklar med grafen och sedan forma produkten, vilket är en av metoderna som används inom additiv tillverkning. Angreppssättet är inte begränsat till metaltillverkning utan skulle potentiellt kunna användas inom all additiv tillverkning.

Testbäddar och pilotanläggningar

Det finns ett stort antal testbäddar och pilotanläggningar i Sverige. Många av dessa är dedikerade till områden där grafen anses ha stor potential att bidra till nya tillämpningar. Det sker dock väldigt lite grafenutveckling i nuvarande testbäddar och pilotanläggningar i Sverige. En anledning till detta kan vara att många företag som skulle kunna ha nytta av testbäddarna inte känner till möjligheterna eller hur de fungerar. Här bör SIO Grafen både kunna sprida information om möjligheterna samt underlätta ingången till testbäddarna bättre. Ett första steg kan vara att belysa de anläggningar som är lämpliga för grafenutveckling med en form av grafenmärkning.

Trots att det finns många testbäddar i Sverige kan det finnas områden där det saknas tydliga möjligheter för grafenutveckling. I samband med den ökade synligheten av existerande testbäddar bör det därför även undersökas vad som saknas. Det skulle till exempel kunna röra sig om ett nytt innovationslabb med fokus på grafen. Detta skulle kunna fungera som en naturlig väg in i övriga testbäddar och pilotanläggningar. Eventuell inriktning och möjligheter till en sådan anläggning behöver dock utredas.

Prediktiv modellering och simulering

En hel del teoretiker arbetar med grafen på universitet både i Sverige och utomlands. En stor del är på relativt låg TRL-nivå men arbetet kan leda till spännande tillämpningar inom till exempel elektronik på sikt. Projekt har utförts för att koppla ihop vad som är känt på väldigt liten nivå (nanometerskala) inom akademien med vad som modelleras inom industrin. Det finns dock mycket som kan vidareutvecklas.

Det finns ett stort antal parametrar att optimera för att inkorporera grafen i andra material. Till exempel alla egenskaper hos grafenet självt (lateral storlek, tjocklek, syrehalt, defekter samt hur uniformt materialet är), hur det är funktionaliserat, vilket

material det ska sammanbindas med, hur alla processteg ska utformas, etc. Att kunna modellera flera av dessa parametrar för att underlätta det experimentella arbetet i att ta fram nya komponenter vore således mycket fördelaktigt. Många modeller som används främst inom akademien förklarar befintliga resultat. Den stora potentialen ligger dock i att kunna prediktera nya resultat. Simulering av hur material med grafen beter sig i olika tillämpningar är därmed ett område med stor potential.

Digitalisering och artificiell intelligens är ämnen som har fått mer och mer uppmärksamhet under de senaste åren. Eftersom optimering av tillverkning av både grafen och produkter med grafen kräver övervakning av flera parametrar parallellt, kan vi förvänta oss att se mer och mer koppling mellan dessa ämnen och grafentillverkning i framtiden. I en separat rapport, som kommer att publiceras av SIO Grafen senare under 2020, diskuteras hur artificiell intelligens bäst kan tas tillvara av de som arbetar med grafen på olika sätt.

Kommunikation

Det bästa sättet att utöka tillverkningen av grafen är med största sannolikhet att utöka efterfrågan. Detta innebär både ökat engagemang från de som redan arbetar på området och att fler organisationer undersöker och använder grafen. Många svenska organisationer har nu engagerat sig i grafenutveckling. I dagsläget är 16 företag med i kompetenscentrumet 2D-TECH och 140 organisationer har varit involverade i projekt inom SIO Grafen. För fortsatt utveckling av grafenområdet behöver ännu fler aktörer engageras. Som redan nämnts skulle vi vilja se ökad involvering av tillverkare av utrustning för grafentillverkning, men även till exempel fler aktörer som kan funktionalisera materialet och inkorporera grafen i halvfabrikat.

För att göra fler intresserade vill vi se fler "success stories" och ökad exponering av goda exempel både inom SIO Grafen och inom andra populärvetenskapliga kanaler, till exempel Ny Teknik och olika branschtidningar. Det har gjorts mycket arbete kring grafen på svenska universitet, institut och företag men informationen och lärdomarna från dessa behöver spridas i högre utsträckning.

Tröskeln för att komma in i grafenvärlden och börja arbeta med materialet är hög för personer och företag som saknar tidigare erfarenhet. För att underlätta för nya aktörer att integreras i området ser vi ett behov av olika introduktionsmaterial (till exempel webinarier, kurser, litteratur) och best practice-guides.

Grafen i industrin

Som ett strategiskt innovationsprogram har SIO Grafen en planerad maximal tid på 12 år, vilket löper till och med år 2026. Visionen är att Sverige ska vara bland de bästa länderna i världen på att industriellt använda grafen år 2030. Det blir därmed viktigt att grafen blir ett etablerat material som utvecklare kan använda utanför SIO Grafen. Detta händer redan då företag gör egna satsningar samt erhåller medel från andra utlysningar, men det kommer bli ännu viktigare att grafen ses som ett etablerat material för fortsatt grafenutveckling på sikt.

Utvecklingen av grafenområdet har gått snabbt jämfört med andra material både internationellt och i Sverige. Trots att det bara är drygt femton år sedan grafen började utforskas finns det redan svenska produkter på marknaden och materialet kan tillverkas i stor skala. Men för att utveckla området till en verkligt stor marknad krävs fortsatt hårt arbete.

Grafen har stor potential att förbättra olika material inom många, helt skilda områden. Detta kan både ses som en styrka och en svaghet då möjligheterna är många, samtidigt som utvecklingen saknar ett naturligt fokus. Denna färdplans fokus på styrkeområde tillverkning inom SIO Grafen (vilket bland annat även inkluderar process- och produktionsutveckling) lägger dock grunden till alla dessa möjligheter. Det skulle kunna finnas fördelar med att fokusera utvecklingen på ett fåtal områden. Dessa skulle kunna lösa frågeställningar och bana vägen för andra områden. Den typen av satsningar görs till exempel på Europa-nivå med "Spearhead"-projekt inom Graphene Flagship.

Ett sätt att ytterligare stärka Sveriges position skulle vara att utnyttja materialet grafen i motsvarande satsningar inom områden där svensk industri internationellt sett redan är starka, till exempel inom stål-, pappers- och fordonsindustrin. Batteriutveckling är ett annat område där svenska organisationer driver utvecklingen i Europa, till exempel med kompetenscentrum (Batteries Sweden, BASE), leder Europasatsningar (Battery 2030+) samt universitet (främst Uppsala Universitet, men inte begränsat till dem) och företag som väntas bli stora på den europeiska marknaden (Northvolt). SIO Grafen har finansierat projekt inom samtliga dessa områden, men det finns potential för betydligt fler tillämpningar. Dessa satsningar skulle även potentiellt kunna fortsätta efter att SIO Grafen avvecklas som program. Det finns dessutom redan produkter på marknaden från internationella konkurrenter.

Ett första steg till ökat fokus på grafen inom dessa industrier (stål, papper, fordon samt batterier) är workshoppar fokuserade på de olika områdena. Efter att SIO Grafen höll en fokusworkshop kring batterier kom det in fler ansökningar om bidrag till grafenutveckling inom energitillämpningar. Detta kan även koordineras med andra strategiska innovationsprogram som till exempel Metalliska material, med möjlighet till gemensamma utlysningar.

Mål

SIO Grafens övergripande mål är att:

- Etablera grafen som ett svenskt industriellt styrkeområde
- Stärka samverkan och värdekedjor tvärs sektorer
- Stimulera svensk grafentillverkning
- Grafen stödjer omställning till hållbart samhälle

Målen nedan för SIO Grafens styrkeområde tillverkning är nära sammankopplade med de generella målen för utveckling och etablering av grafen som material i Sverige. Tidsperspektivet för utvecklingen av mål och prioriteringar är 2025 och 2030. En viktig aspekt är att SIO Grafens planerade maximala tid löper ut under år 2026. SIO Grafen kan därmed arbeta aktivt med föreslagna aktiviteter för att nå målen för 2025, men inte på samma sätt för målen med tidsperspektiv på år 2030.

Mål för utveckling av grafentillverkning och tillhörande processer

Till år 2030:

A30:1 Materialförädlade företag med grafenerbjudanden etablerade (20 st).

A30:2 Grafen är ett etablerat material för svenska produktproducenter.

Till år 2025:

A25:1 Minst 10 etablerade svenska grafenleverantörer.

A25:2 Uppskalade produktionsprocesser hos minst 5 grafenleverantörer.

A25:3 Grafen är ett etablerat material för svenska produktproducenter.

A25:4 Materialförädlade företag med grafenerbjudanden etablerade (5 st).

A25:5 Tre projekt fokuserade på andra 2D-material än grafen inom SIO Grafen.

Mål för utveckling av karakterisering och standardisering av grafen

Till år 2030:

B30:1 Utvecklad vokabulär och kategorisering kring olika typer av grafen på plats.

Till år 2025:

B25:1 Etablerade arbetssätt för karakterisering av grafen på plats.

Mål för användning av testbäddar eller pilotanläggningar

Till år 2030:

C30:1 Minst 30 grafenprojekt i testbäddar eller pilotanläggningar.

Till år 2025:

C25:1 Minst 5 grafenprojekt i testbäddar eller pilotanläggningar.

Mål för utveckling av grafenindustrin

Till år 2030:

D30:1 Fortsatta finansieringsmöjligheter kring grafen.

D30:2 Förädlade produkter på marknaden 100 (ej enbart material).

D30:3 Antal anställda som arbetar med grafen: 2000.

Till år 2025:

D25:1 Förädlade produkter på marknaden: 10 (ej enbart material).

D25:2 Antal anställda som arbetar med grafen: 1000.

D25:3 Ökad förståelse kring vilket grafen som passar för olika tillämpningar.

Aktiviteter

En lista över konkreta insatser och aktiviteter under de närmaste åren föreslås för att nå målen (identifierade ovan) i tabellen nedan.

Aktivitet	Ansvarig / deltagare	Tidpunkt	Kopplar till mål
Tillverkning av grafen i Sverige			
Etablera en grupp för svenska leverantörer av 2D-material som kan fortsätta påverka för att etablera svensk grafentillgång.	Alla svenska leverantörer av 2D-material. Facilitering av SIO Grafen.	2020 - löpande	A30:2 A25:1-3
Mer involvering av tillverkare av maskiner och utrustning för grafentillverkning och processning.	SIO Grafens uppsökande verksamhet	2021 -	A30:1-2 A25:1-4
Fler best practice projekt. Likt om kompositser.	Utllysningar från SIO Grafen	2021	D25:3
Datablad, karakterisering och standardisering			
Uppdatera leverantörsguiden.	SIO Grafen	2020 med uppdateringar varje år	D30:2 D25:1
Framtagning av "Good practice" guider för karakterisering av grafen med fokus på metoder som är lämpliga för industriell användning.	SIO Grafen och svenska analysleverantörer	2020 -	B25:1
Kommunikation av befintliga och nya standarder till det svenska grafennätverket.	SIO Grafen	2020 - löpande	B30:1 B25:1
Påverka utvecklingen av internationella standarder. Delta i internationellt arbete samt utveckla egna vid behov.	SIS och deras medlemmar i TK516. RISE	2020 -	B30:1 B25:1
Ta fram en färdplan för standardisering av grafen i Sverige.	SIS och deras medlemmar i TK516	2021-2022	B30:1 B25:1

Testbäddar och pilotanläggningar			
Ökad visualisering av testbäddarna och möjligheter inom dem i grafennätverket. Inklusiva lyfta fram de anläggningar som är lämpliga för grafenutveckling.	SIO Grafen och testbäddsägarna.	2021	C30:1 C25:1
Utnyttja etablerade testbäddar.	Utvecklande företag. SIO Grafen ge stöd i kontakten med testbäddsägarna.	2022	D30:2 D25:1 C30:1 C25:1
Undersöka behov och inriktning på ny eventuell testbädd / pilotanläggning / innovationslabb fokuserad på grafen.	SIO Grafen	2024	C30:1
Kommunikation			
Ta fram och marknadsför fler "success stories", både korta som visar på bredden och längre med lite mer detaljer som kan ge inspiration till nya lösningar.	SIO Grafen och alla deras aktörer som har <i>success stories</i> .	2020 - löpande	A30:1 A25:1-2,4-5 D30:2-3 D25:1-2
Ta fram introduktionsmaterial (broschyrer, webinarier etc.) till grafen (och andra 2D-material) för att göra det enklare för nya aktörer att ta sig in i grafenområdet.	SIO Grafen	2020 - 2021	A30:1 A25:1-2,4-5 D30:2-3 D25:1-2
Strategiskt projekt om hälsoaspekter.	SIO Grafen	2020 med årlig uppdatering	A30:1 A25:1-2,4-5 D30:2-3 D25:1-2

Strategiskt projekt om återvinning.	SIO Grafen	2020 med årlig uppdatering	A30:1 A25:1-2,4-5 D30:2-3 D25:1-2
Involvering av fler aktörer med olika bakgrund i grafennätverket. Fler tillverkare av utrustning och av halvfabrikat med grafen (tex komponderare).	SIO Grafens uppsökande verksamhet	2020 -	A30:1 A25:4
Ökad informationsspridning om möjligheter med andra 2D-material.	SIO Grafen	2021-	A25:5
Mer kommunikation om grafen från inflytelserika personer – inom näringsliv, finansiärer, politiker etc.	Intressenter i grafennätverket. Koordineras av SIO Grafen	2021-	D30:3 D30:2
Workshop om modellering och simulering.	SIO Grafen	2021 med uppdatering vartannat år	D25:3
Strategiskt projekt kring modellering och simulering.	SIO Grafen	2021	D25:3
Fokusworkshoppar inom områden där svensk industri redan är stark såsom stål-, pappers- och fordonsindustrierna.	SIO Grafen	2021-2022	D30:1-3
Finansiering			
Fortsatt stöd från SIO Grafen för innovationsprojekt. Detta inkluderar riktade utlysningar med fokus på produktions- och processutveckling.	SIO Grafen, Vinnova, Energimyndigheten, Formas	2020-2026	A25:1-5 B25:1 C25:1 D25:1-3
Upprätthålla ett gott samarbete mellan SIO Grafen och andra SIP:ar, inklusive organisera gemensamma workshoppar och utlysningar.	SIO Grafen	2020-2026	C30:1 C25:1 D30:1

Definiera några prioriterade tillämpningsområden för grafen.	SIO Grafen	2022-	
Undersöka nya satsningar på grafen och andra 2D-material. Vad händer efter SIO Grafen?		2023	

Nuläge – hur ser grafenområdet ut i dag?

Nulägesbeskrivningen fokuserar på situationen i Sverige och utgår från ett industriellt perspektiv, eftersom färdplanen avser svensk industri och svenska aktörer. I nulägesbeskrivningen diskuteras:

- Olika typer och tillverkningsmetoder av grafen
- De svenska grafenleverantörerna
- Viktiga internationella leverantörer
- Tillämpningsområden
- Karakterisering och standardisering
- Större internationella investeringar i forskning och utveckling med fokus på grafen
- Svenska testbäddar och pilotanläggningar
- Grafen och hälsa

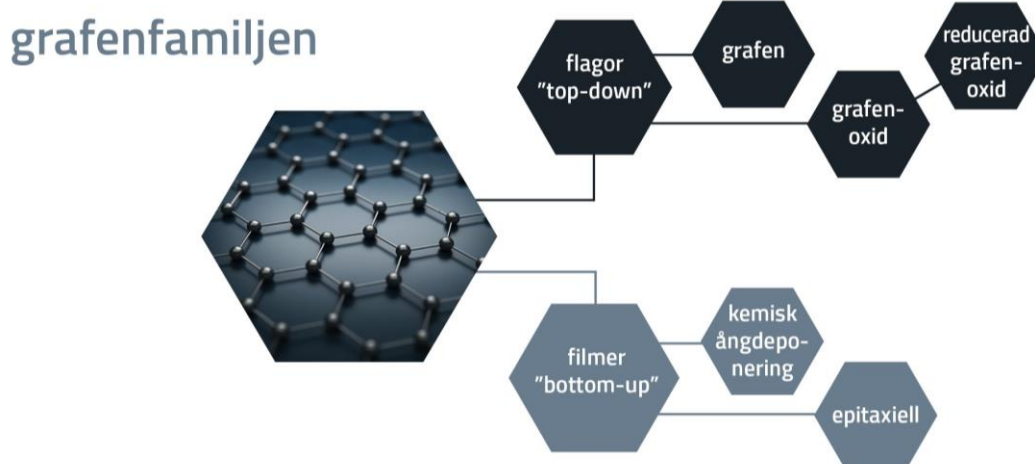
Översikt över typer och tillverkningsmetoder av grafen

Denna färdplan ger en kort översikt över de vanligaste grafenmaterialen och tillverkningsmetoderna. En mer heltäckande studie över tillverkning av grafen och relaterade material publicerades i januari 2020 av Claudia Backes tillsammans med ett stort antal forskare inom Graphene Flagship⁸. Artikeln syftar till att ge praktiska detaljer av en stor mängd metoder så att fler ska kunna tillverka grafen.

Det finns många olika typer av grafen, och de olika grafenmaterialen kan enklast delas in i två olika huvudgrupper: filmer och flagor, se Figur 1. Filmerna tillverkas generellt genom så kallade "bottom-up"-metoder där grafenet bildas från mindre beståndsdelar, till exempel från molekyler i metangas. Flagorna tillverkas oftast genom så kallade "top-down" metoder där grafit exfolieras ner till tunna grafenflagor.

Filmerna kan sedan ytterligare delas in i grafen tillverkad med kemisk ångdeponering, ofta kallat CVD grafen efter engelskans *chemical vapour deposition*, samt epitaxiell grafen. Flagor som nästan helt består av kol benämns grafen, medan flagor med hög syrehalt kallas grafenoxid. Grafenoxiden kan sedan reduceras till reducerad grafenoxid med egenskaper som ligger mellan grafen och grafenoxid.

⁸ C. Backes *et al.* Production and processing of graphene and related materials. *2D Mater.* **7**, 022001 (2020)



Figur 1 Översikt över hur de olika typerna av grafen kan delas in i undergrupper.

Det finns i nuläget betydligt fler tillämpningar för flagor än för filmer av grafen och förväntningarna är att samma mönster kommer dominera utbudet även fortsättningsvis. Olika marknadsanalyser brukar uppskatta att flagorna kommer stå för majoriteten (mer än 85%) av marknaden⁹.

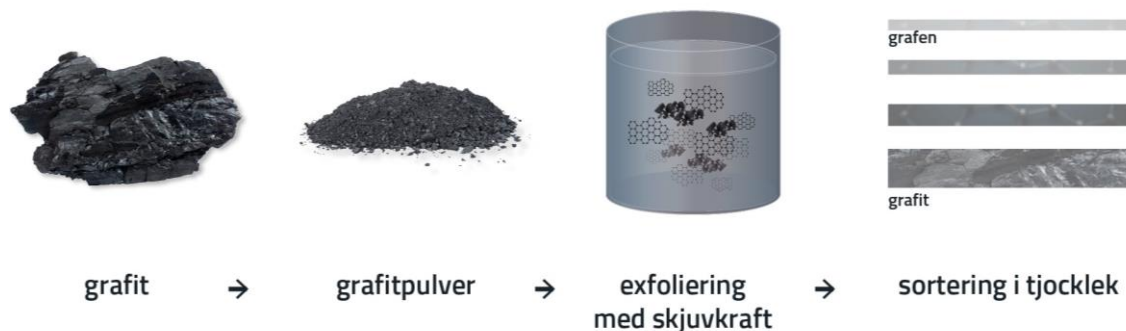
Flagor

Flagorna framställs oftast genom att exfoliera grafit till tunna grafenflagor. Detta kan göras mekaniskt eller kemiskt. De mekaniska processerna resulterar i flagor som nästan enbart består av kol, medan de kemiska processerna ger grafen med stor andel syre – kallat grafenoxid. Grafenoxiden kan sedan reduceras till reducerad grafenoxid med egenskaper mellan grafen och grafenoxid.

I de mekaniska metoderna appliceras generellt skjuvkrafter i en vätska för att exfoliera grafit till grafen, se Figur 2. De kemiska metoderna är också vätskebaserade och fungerar i princip genom att grafit oxideras med starka syror till grafitoxid som sedan med skjuvkrafter kan exfolieras till grafenoxid. Lagren kan också separeras genom elektrokemiska metoder. Alla metoderna producerar flagor med en bred storleksfördelning. Olika storlekar kan sedan till viss del separeras, genom till exempel centrifugering, men alla kommersiella material har en storleksspridning.

⁹ K. Ghaffarzadeh (IDTechEx), Graphene, 2D Materials and Carbon Nanotubes: Markets, Technologies and Opportunities 2019-2029 (2019)

grafenflagor



Figur 2 Exfolieringsprocess från grafit till grafenflagor. Grafit mals till ett pulver och sedan separeras grafenlagren genom att applicera skjuvkrafter i en vätska. De resulterande partiklarna separeras sedan beroende på deras storlek. Det finns även kemiska metoder utöver denna mekaniska process för att tillverka grafen.

Flagorna av grafen har typiskt en lateral storlek i mikrometer-skala. För att klassas som grafenmaterial ska de ha en tjocklek under tio atomlager. GNP (efter engelskans graphene nanoplatelets) är ett vanligt samlingsnamn för flagor som består av flera atomlager. De kemiska metoderna kan generellt ge tunnare flagor, men är dyrare.

De kemiska tillverkningsmetoderna skapar defekter i grafenskiikten. Detta leder till att grafenflagor som produceras med mekaniska metoder generellt har bättre inneboende egenskaper än grafenoxid. Defekterna medför dock att det kan vara enklare att koppla samman grafenoxid med andra material (till exempel polymerer) vilket kan ge en bättre slutprodukt.

Det finns således många olika flagor med olika egenskaper i materialfamiljen grafen. De olika tillverkningsmetoderna resulterar i flagor med olika antal lager och tjocklek, lateral storlek, andel syre, löslighet, både termisk och elektrisk ledningsförmåga, defekter, etc.

Det finns över 100 grafenleverantörer i världen och produktionskapaciteten för flagor av grafen uppskattades under 2019 till omkring 6000-7000 ton per år.¹⁰ Detta är dock en väldigt osäker siffra. Det mesta av framställningen sker i Kina, men även leverantörer i Europa och Amerika utökar kapaciteten rejält. Efterfrågan har dock uppskattats till endast cirka 10-20 % av kapaciteten.¹⁰ I Sverige skalas kapaciteten

¹⁰ Enligt T. Barkan (the Graphene Council) och K. Ghaffarzadeh (IDTechEx) under Graphene2019.

under 2020 upp till tiotals ton, se mer information under avsnittet om Svenska leverantörer nedan.

De flesta grafenprodukter som finns på marknaden i dag är kompositer av polymerer och grafen. Den typ av grafen som används här förekommer nästan uteslutande i form av flagor.

Vid framställningen av grafenflagor erhålls en vätskesuspension med väldigt låg koncentration. Detta är ett bekymmer för transporten av grafen då den största kostnaden går till att transportera en tung vätska (vatten) och inte själva grafenet. De flesta leverantörerna torkar därför sina suspensioner och levererar istället ett pulver. Beroende på det specifika materialet kan pulvret dock ha en väldigt låg densitet, vilket medför att volymen istället blir begränsande för transporter. Detta medför att det även på sikt kan vara fördelaktigt att producera grafen lokalt. Dessutom är många aktörer längre upp i leverantörskedjorna ovan vid att hantera ett pulver, framförallt ett pulver med väldigt låg densitet.

Råvaran grafit

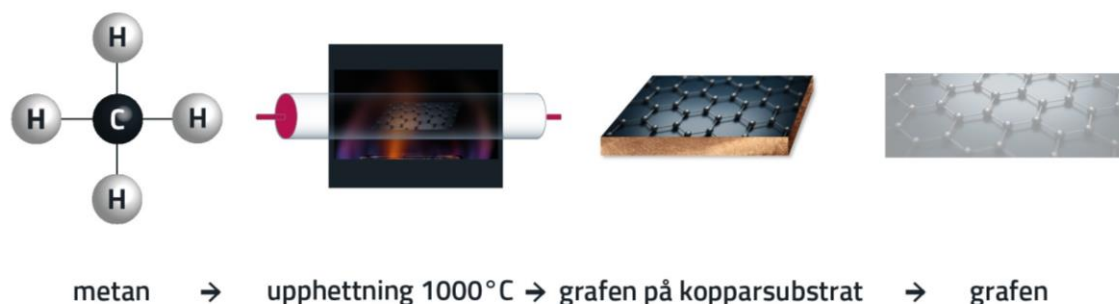
Egenskaperna hos grafenflagorna beror på den specifika framställningsmetoden, men även på grafitråvaran. Sammansättningen av grafiten (andelen kol, syre och metaller) och storleken på grafitpartiklarna är olika i olika gruvor.

Grafit har länge varit ett viktigt material för ståltillverkning och används numera i allt större volymer för batterier, till exempel litiumjonbatterier. Den stora efterfrågan och det faktum att omkring 70% av all grafit produceras i Kina har lett till att grafit klassas som ett kritiskt material. På sikt om/när grafen produceras i verkligt stor skala och batteriproduktionen har utökats skulle det alltså kunna bli stor konkurrens om grafitråvaran. Det finns grafitfyndigheter i Sverige, främst via bolagen Leading Edge Materials och Talga Resources. Norge är dessutom redan bland de tio största producenterna i världen.

Filmer

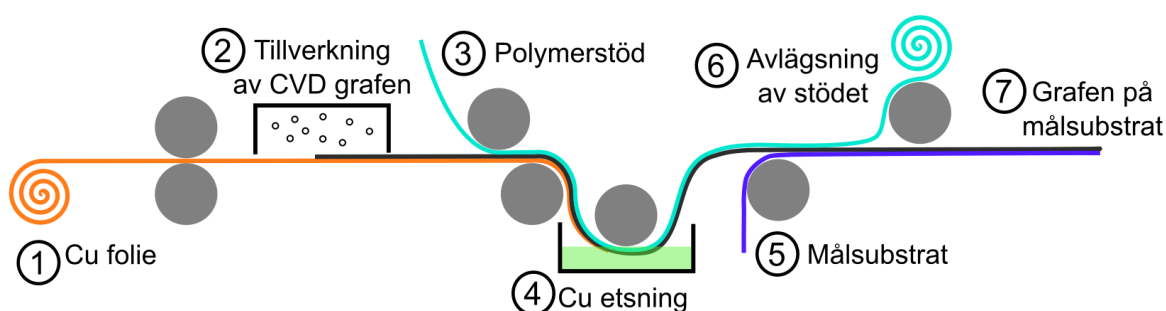
Grafen tillverkat med kemisk ångdeponering, CVD, har vanligen hög kvalitet och går att tillverka i stor skala. Oftast tillverkas denna typ av grafen genom att metangas bryts ner till sina beståndsdelar kol och väte på kopparfolie som värmts upp till omkring 1000 °C, se Figur 3. En grafenfilm bildas på kopparfolien och kan efteråt överföras till ett annat substrat.

grafenfilm



Figur 3 Grafenfilmer kan tillverkas genom kemisk ångdeponering, CVD, där kolatomer från metangas bygger upp grafen på kopparfolie vid omkring 1000 °C. Grafenet kan sedan avlägsnas från kopparfilmen och appliceras på andra substrat.

Redan 2013 visade Sony att det är möjligt att producera grafen med en rulle-till-rulle (R2R) process, se Figur 4, vilket möjliggör storskalig tillverkning. Flera företag har sedan dess skalat upp tillverkningskapaciteten och kvaliteten är relativt hög, åtminstone för produktion i mindre skala. En stor utmaning ligger i att R2R-processerna tillverkar grafen på kopparsubstrat och kräver en svår överföringsprocess till tillämpningssubstratet (ofta Si/SiO₂ för elektronik). För att överföra grafen måste först grafenlagret separeras från tillverkningssubstratet, vilket är svårt att göra utan att skada grafenlagret. Manipuleringen av grafenlagret, som endast är ett atomlager tjockt, under överföringen i sig är också känslig. Vidhäftningen till målsubstratet är inte uppenbar och i de flesta fall har grafenlagret oönskade rynkor. Dessutom är det stor risk för oönskad kontaminering under processen. Överföringen är därmed en utmaning för att nå den kvalitet som krävs för tillämpningar inom till exempel elektronik. Ett alternativ för att slippa överföringsprocessen är att tillverka grafenet direkt där det ska användas, men detta kräver vidare uppskalningsutveckling för att säkerställa grafenets kvalitet (enhetlighet och elektriska egenskaper).



Figur 4 R2R tillverkning och överföring av grafen till ett målsubstrat. Kopparfolie (1) är använt för tillverkning av CVD grafen (2). Ett polymerstöd (3) introduceras för att stabilisera grafen när kopparfolien etsas (4) och innan grafenet appliceras på målsubstratet (5). Efter avlägsning av stödet (6) finns det bara grafen kvar på målsubstratet (7).

Epitaxiell grafen har väldigt hög kvalitet och används därmed oftast inom tillämpningar med höga kvalitetskrav, till exempel sensorer. Grafenet tillverkas genom sublimering av kisel på skivor (wafers) av kiselkarbid. Metoden är relativt dyr och svår att skala upp till riktigt stora volymer då den är begränsad till skivskala och inte R2R-processer.

Det går även att tillverka filmer från flagor av grafen. Dessa kallas ibland för grafenpapper och har andra egenskaper än grafen som tillverkas som filmer med ovanstående process. Filmerna av grafen kan kontrolleras till att bestå av exakt ett lager av kolatomer och med en nästan heltäckande ytbeläggning. Grafenpapper består istället av många sammanlänkade flagor och är oftast flera mikrometer tjocka.

Filmerna av grafen är i första hand lämpade för tillämpningar inom elektronik. Eftersom CVD genererar sammanhängande filmer, kan de även vara intressanta för barriärtillämpningar som kräver väldigt täta barriärer. Eftersom CVD grafen är dyrare än flagor behöver den kommersiella produkten också klara ett högre pris.

Övriga tillverkningsmetoder och typer av grafen

Forskningen som ledde till nobelpriset i fysik 2010 gjordes med grafen tillverkad genom exfoliering av grafit med vanlig tejp. Även om processen ger väldigt hög grafenkvalitet är den inte skalbar och har därmed ett mycket begränsat industriellt intresse.

Det är möjligt att tillverka grafenflagor från andra råmaterial än grafit. Exempelvis har många olika typer av biomassa använts, där restprodukter från skogsindustrin kan vara det mest intressanta ur ett nationellt perspektiv.

Funktionalisering av grafen

För att kunna blanda in grafen i andra material kan kopplingen mellan grafenet och matrisen behöva förstärkas. Detta kan göras genom att funktionalisera grafenet, vilket innebär att fästa olika molekyler på grafenet där molekylerna interagerar starkare med matrisen än vad grafenet själv gör. Det är dock än så länge stor spridning på hur utvecklad inblandningen är i olika sorters kompositter och, till exempel, olika sorters polymerer.

Andra 2D-material

Grafit kan exfolieras till grafen eftersom det är ett skiktat material. Det är alltså relativt enkelt att skala bort ett grafenlager från grafit. På motsvarande sätt finns över 5000 andra skiktade material. Uppskattningsvis är runt 1000 av dessa enkla att

exfoliera till andra 2D-material¹¹, men bara en bråkdel av dem har framställts än så länge. Det har arbetats allra mest med grafen, medan andra vanliga 2D-material är bornitrid (isolerande), WS₂ och MoS₂ (halvledare). Andra mer exotiska enlayersmaterial som undersöks inkluderar NbSe₂ (metalliskt), InSe (halvledare) och "fosforen" (ett lager svart fosfor, en halvledare). Dessa andra 2D-material produceras genom exfoliering eller med kemisk ångdeponering (i upp till ca. 20 cm skala). Utvecklingen av de metoderna ligger dock generellt flera år efter motsvarande metoder för grafen.

Beroende på sammansättning och struktur har de olika 2D-materialen skilda egenskaper och är lämpliga för olika tillämpningar. Halbledare kan användas i transistorer, eftersom i motsats till grafen har de ett riktigt "off-tillstånd". MoS₂ är optiskt aktivt och kan användas i optoelektroniska komponenter. Bornitrid leder inte elektriskt men har en mycket god värmeledningsförmåga och är därför ett intressant material för tillämpningar där värmeledningsförmåga behövs i ett material som inte får leda elektrisk ström. Bornitrid har också använts för att inkapsla grafen och isolera grafenet från effekter från substrat och omgivning. Grafenkomponenter som är inkapslade i bornitrid är i allmänhet av mycket högre kvalitet och föredras för applikationer som kräver högre frekvenser. På sikt kommer det även vara möjligt att kombinera dem för att skräddarsy material med nya egenskaper. Detta är kanske främst intressant för elektronik där nya komponenter kan tillverkas av kombinationer av olika 2D-material.

Svenska leverantörer

Flera av de svenska grafenleverantörerna framhäver att de använder en grön eller energisnål metod för framställning. De leverantörer som anges här antingen tillverkar eller förädlar grafenmaterial, däremot är inga återförsäljare medtagna. I juni 2020 finns totalt sju leverantörer av grafenmaterial i Sverige:

- 2D fab – använder en mekanisk process för att tillverka flagor av grafen. Skalar under 2020 upp produktionen till tio ton per år. Grundades 2013.
- Bright Day Graphene – tillverkar grafenflagor från restprodukter från skogsindustrin. Startade under 2017 och tillverkar än så länge i liten skala.
- Grafren – sorterar grafen efter olika storlekar. Grundades år 2018.
- Graphensic – är globalt sett en utav relativt få tillverkare av epitaxiell grafen. Spin-off från Linköpings Universitet, grundades 2011.

¹¹ Mounet, N. *et al.* Two-dimensional materials from high-throughput computational exfoliation of experimentally known compounds. *Nat. Nanotechnol.* **13**, 246 (2018)

- Graphmatech – funktionaliserar och förädlar grafen. Skalar upp produktionen under 2020 från två ton/år till tio ton/år. Spin-off från Uppsalas Universitet, grundades 2017.
- SHT – Smart High Tech – fokuserar på grafen för kylning av elektronik, men har också haft flera projekt med till exempel grafen i betong. Spin-off från Chalmers Tekniska Högskola, grundades 2006.
- Talga – använder en elektrokemisk metod för grafentillverkning. Talga är ett multinationellt företag som grundades 2010 och som nu håller på att etablera sig i Sverige.

En observation om de svenska leverantörerna ovan är att ingen av dem kommersiellt levererar CVD-grafen.

Viktiga internationella leverantörer

Syftet med detta avsnitt är att lyfta fram viktiga grafenleverantörer utanför Sverige, särskilt de som antingen har stor kapacitet eller som används av svenska aktörer. Målet med detta avsnitt är därmed inte att göra en uttömmande lista över alla leverantörer. En sådan lista är redan tillgänglig via [SIO grafens webbplats](http://SIO.grafens.webbplats) siografen.se.

Det finns flera viktiga internationella leverantörer av grafenmaterial:

- Abalonyx (Norge) – startade under 2005 och levererar grafenoxid och reducerad grafenoxid sedan 2014. De har nu nått en kapacitet på ett ton/år och planerar att expandera till tio ton/år under de kommande åren.
- Avanzare (Spanien) – grundades år 2004. De levererar grafen, grafenoxid och reducerad grafenoxid. Kan producera i industriell skala men den faktiska volymen är inte offentlig.
- BeDimensional (Italien) – säljer grafenflagor och kan producera flera kg/år. De fick en stor investering i slutet av 2018, vilket gör att de dramatiskt ökar sin kapacitet med en plan för flera ton/år under 2020.
- Global Graphene Group (USA) – grundades 2007 och har en av de största kapaciteterna med 200 ton/år för grafenflagor, grafenoxid och reducerad grafenoxid. De är registrerade inom REACH och erbjuder också olika produkter, från beläggningar till batterier och värmespridare.
- Graphenea (Spanien) – startade under 2009 och är den viktigaste leverantören av CVD-grafen i Europa. De levererar också grafenoxid och reducerad grafenoxid. Företaget har REACH-registrering sedan 2016 och från 2017 kan de producera ett ton grafenoxidflagor per år, en siffra som kommer att öka de närmaste åren. Den nuvarande kapaciteten för CVD är ungefär 18 000 skivor (fyra, sex eller åtta tum) per år. De har också en grundläggande tjänst där de erbjuder redan mönstrade chip ("foundry"), främst för olika sensorer.

- Sixth Element (Kina) – tillverkar flera olika sorters grafenflagor med en kapacitet på 260 ton/år. Bolaget är REACH-registrerat.
- Standard Graphene (Sydkorea) – började arbeta med grafenprodukter 2006 och konstruerade världens första linje för massproduktion av grafen 2009. Har kapacitet på 4,4 ton grafenoxid och 1,1 ton reducerad grafenoxid per år.
- Versarien Group (Storbritannien) – grundades 2010 och är modergruppen för några få materialföretag, varav tre är grafenrelaterade företag: 2-DTech, Cambridge Graphene och Gnanomat. De är REACH-registrerade och under 2018 annonserades en plan för att öka produktionen av grafenflagor för att nå tre ton/år i slutet av 2019.
- XG Science (USA) – har två fabriker med en sammanlagd produktionskapacitet på 300-600 ton/år för grafenflagor.

Som nämnts tidigare finns det utöver de nämnda ovan många fler leverantörer. Det finns mycket aktivitet i Asien, även om det inte är alltid lätt att få tillgång till information. Produktionskapaciteten är betydligt högre i Kina än i Europa och USA. Flera företag, exempelvis LG Electronics (Sydkorea) och Grolltex (USA), kan också producera CVD-grafen i rulle-till-rulle processer. De skalar upp produktionen och kapaciteten kan mätas i flera 1000-tals kvadratmeter per år.

Företagen uppger oftast inte hur mycket grafen de säljer, men generellt sett är tillverkningskapaciteten mycket högre än den producerade mängden.

Tillämpningar

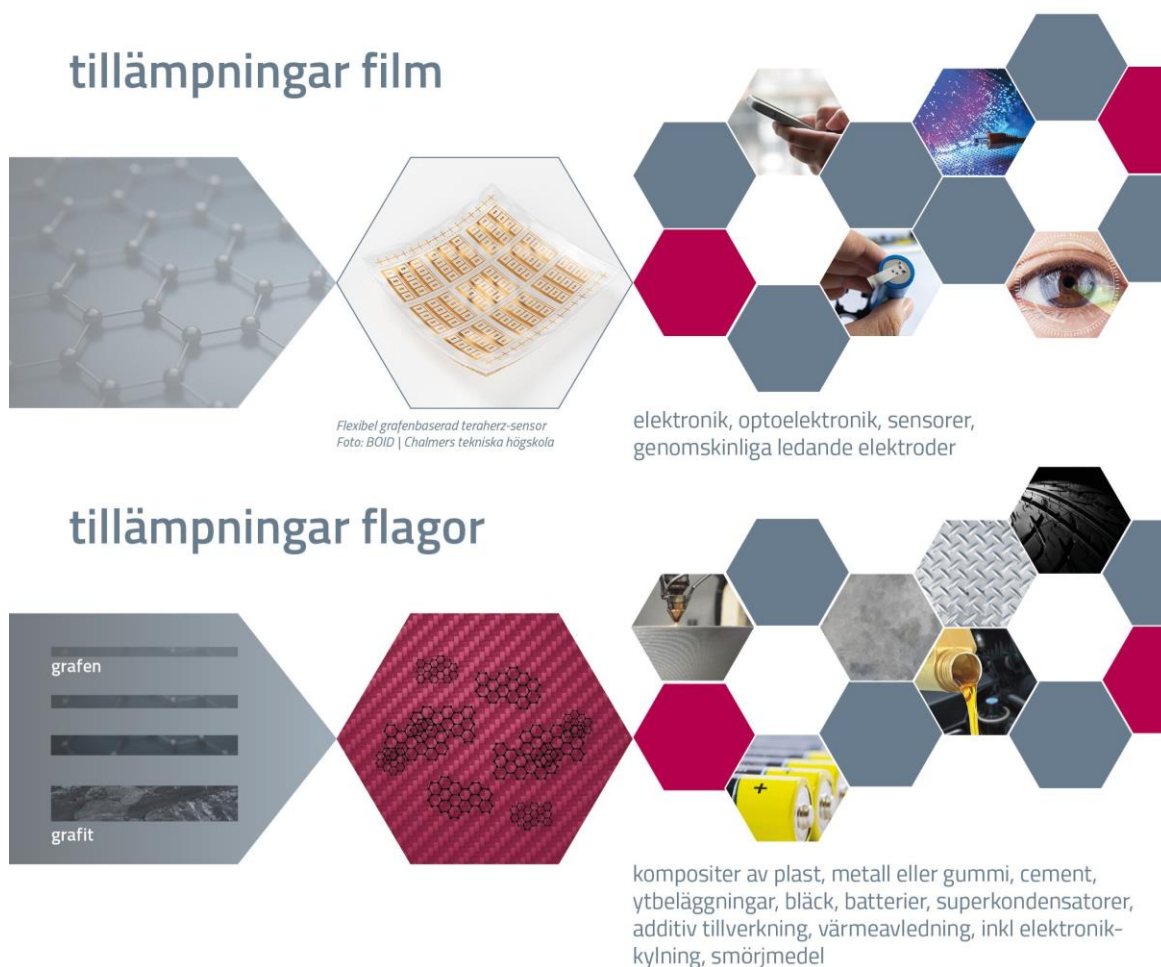
Det finns en stor mängd potentiella tillämpningar för grafen. Generellt sett är de olika typerna av grafen lämpliga för olika tillämpningar, se Figur 5.

Grafen kan adderas till material för att förbättra dess egenskaper, addera nya egenskaper och även möjliggöra helt nya lösningar. Grafen kan till exempel adderas till polymerer för att förbättra deras mekaniska egenskaper, göra dem elektriskt eller termiskt ledande. Detta kan sedan användas inom en stor mängd helt skilda tillämpningsområden eller möjliggöra helt nya tillämpningar som till exempel nya typer av batterier. Grafen kan även användas i olika elektronikkomponenter med stor potential för optoelektronik och inom olika sensorer.

Till skillnad från många andra additiv räcker det att addera en väldigt låg andel grafen (kring 1% beroende på material och önskad egenskap) för att få en stor effekt. Grafen kan också samtidigt förbättra flera olika egenskaper, vilket kan ge ny multifunktionalitet. Det finns flera exempel på att inblandning av grafen även kan användas för att öka produktionstakten av till exempel kompositter och limmer.

År 2019 uppskattades det att marknaden för materialet grafen var 15-50 miljoner USD under år 2015, och att marknaden år 2025 skulle motsvara 200-2 000 miljoner

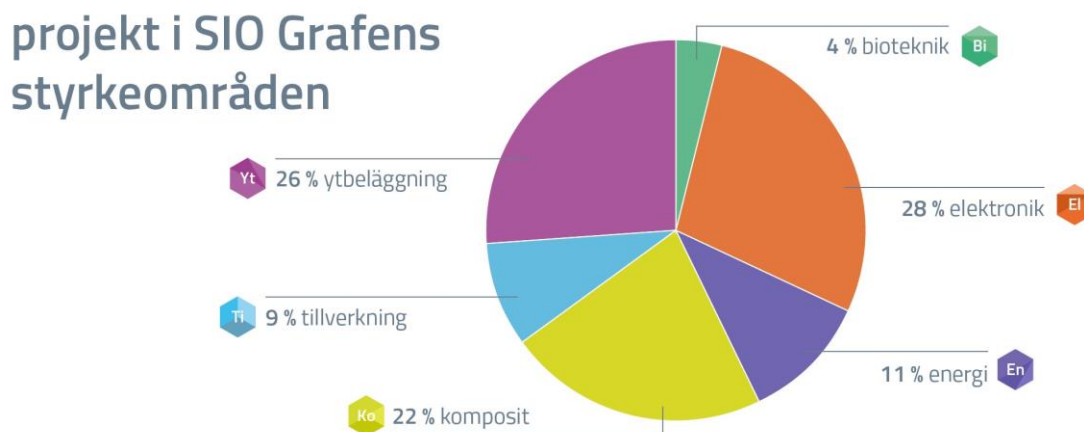
USD.¹² Marknaden för produkter med grafen uppskattades samtidigt vara minst 100 gånger större.



Figur 5 Översiktlig bild över vilka tillämpningsområden de olika typerna av grafen generellt används inom. Den övre delen visar exempel på hur grafenfilmer kan användas för att tillverka komponenter som sedan kan användas i många tillämpningar inom till exempel elektronik. Den undre delen av figuren illustrerar att grafenflagor kan adderas i kompositer som sedan kan användas i mängder av olika tillämpningar. Utöver vad som illustreras i denna bild finns även intressanta tillämpningar inom till exempel elektronik med grafenflagor.

¹² T Reiss, K Hjelt and AC Ferrari, Nature Nanotechnology VOL 14 no 10 s 907-910 (2019)

På SIO Grafens hemsida finns information om vilka styrkeområden alla projekt som fått finansiering genom programmet är placerade inom, se Figur 6. Generellt har ungefär lika många projekt inom elektronik, komposit och ytbeläggningar fått finansiering, medan det har varit lägst antal projekt inom styrkeområde bioteknik. Siffrorna indikerar att tillverkning ligger någonstans i mitten, men området är en viktig del av ett stort antal projekt även om det inte uttryckligen har kopplats till dem.



Figur 6 Cirkeldiagram som visar uppdelningen av vilka styrkeområden projekten finansierade genom SIO Grafen tillhör. Några av projekten har räknats in i fler än ett styrkeområde.

De flesta av de produkter som finns på marknaden är olika kompositer och ytbeläggningar. De förväntas även framöver vara stora och viktiga områden för nya grafenprodukter. På sikt förväntas till exempel elektronik (inklusive optoelektronik, vilket är teknik som även utnyttjar ljus inom elektronik) och energi (till exempel batterier och superkondensatorer) bli andra viktiga områden.

Karakterisering och standardisering

Eftersom det finns så många leverantörer av grafen, många olika typer av grafen med olika egenskaper och som är lämpade för olika tillämpningar, är det också viktigt att kunna särskilja de olika typerna av grafen. Karakterisering och standardisering har därför utpekats som några av de viktigaste områdena för fortsatt grafenutveckling.

Karakterisering

Det finns många olika metoder för att karakterisera grafen. Metoderna mäter olika egenskaper, i varierande detalj och därför beror den mest relevanta metoden på vilken tillämpning som grafenet ska användas till.

Det finns en [större sammanställning över olika analysmetoder](#)¹³ och en [kortare sammanfattning](#)¹⁴ på SIO Grafens hemsida (samt i Tabell 1 nedan). De metoder som ger mer detaljinformation är oftast dyrare och mer avancerade metoder. De metoder som är enklare att inkludera nära tillverkningen ger oftast inte lika mycket detaljer, men kan vara tillräckliga för att se om något förändrats under processen. Ett alternativ kan därmed vara att kontinuerligt använda en snabbare och billigare karakteriseringsmetod som visar förändringar men inte ger detaljer och kombinera detta med enstaka mer avancerade metoder för mer detaljinformation.

Tabell 1 Förenklad tabell över vilka analysmetoder som kan ge information om olika egenskaper hos grafen. Förkortningarna står för AFM – atomkraftsmikroskopi, BET – Brunauer-Emmett-Teller och bestämmer ytarean, DLS – dynamisk ljusspridning, Raman – Ramanspektroskopi, SEM – svepelektronmikroskopi, TGA – termogravimetrisk analys, XPS – röntgenfotoelektronmikroskopi, kallas ibland även ESCA.

Analysmetod		AFM	BET	DLS	Raman	SEM	TGA	XPS
Egenskap	Tjocklek	✓	✓		✓	✓		
	Lateral storlek	✓		✓		✓		
	Ytarea		✓					
	Defekter	✓			✓			
	Kemisk sammansättning						✓	✓
	Kostnad	\$\$\$	\$	\$	\$\$	\$\$	\$	\$\$

När grafenet väl har inkorporerats i en komponent eller blandats in i en komposit kan redan etablerade karakteriseringsmetoder användas. Till exempel är en analys

¹³ J. Ek Weis *et al.* Characterisation Guide Feb. 2018 (2018)

¹⁴ SIO Grafen Det är skillnad på grafen och grafen (2019)

av en plastics mekaniska egenskaper oberoende av om det finns grafen i plasten eller ej.

SIO Grafen har skapat två Round Robin projekt för att både öka kunskapen kring olika grafenmaterial och karakteriseringen av dessa. Det första projektet fokuserade på BET (står för Brunauer-Emmett-Teller och bestämmer ytarean), SEM (svepelektronmikroskopi) och XPS (röntgenfotoelektron-spektroskopi, kallas ibland även ESCA). TGA (termogravimetrisk analys) lades även till under projektets gång. Det finns en mer [utförlig rapport från det första projektet](#) publicerad på SIO Grafens hemsida¹⁵. En av slutsatserna var att provberedning är en kritisk del av karakteriseringen. XPS visade sig fungera väldigt bra för att undersöka funktionaliseringen av grafen, medan det bedömdes att de övriga metoderna behövde undersökas vidare.

Det andra – och fortfarande pågående – Round Robin-projektet fokuserar på att lägga grunderna till en svensk ”good practice guide” för grafenkarakterisering med fokus på industriella tillämpningar. Detta kommer vidareutveckla kunskaperna om SEM och TGA från det första projektet, samt undersöka ljusspridning och Ramanspektroskopi.

National Physical Laboratory, NPL, i Storbritannien är en av de mest drivande internationella aktörerna kring karakterisering och standardisering av grafen. De har publicerat en [”Good practice guide”](#) med råd om hur grafen kan karakteriseras och hur provberedningen bör gå till¹⁶.

Graphene Flagship har lanserat en ”Validation service” som kan hjälpa till med att karakterisera och validera grafenmaterial.

Standardisering

Standarder behövs till exempel för kommunikation mellan olika led i värdekedjorna och för jämförelser mellan olika material. Det är en grundförutsättning för att kunna ha två eller fler leverantörer av samma material, vilket är något alla större industrier kräver.

Det finns internationella kommittéer för standardisering av nanoteknik både inom ISO (International Organization for Standardization) och IEC (International Electrotechnical Commission). Sverige har spegelkommittéer till dessa inom SIS (Svenska Institutet för Standarder) och SEK (Svensk Elstandard) men har inte

¹⁵ M. Ernstsson *et al.* Round Robin characterization (2019)

¹⁶ A. J. Pollard *et al.* (National Management Limited) Good Practice Guide No 145 – Characterisation of the structure of Graphene (2017)

arbetat aktivt inom dem. Under 2019-2020 utforskades det hur Sverige skulle kunna arbeta bättre med standardisering av nya material.¹⁷ En viktig slutsats är att standardisering av hela nanoteknikområdet är för stort för att enskilda individer ska kunna engagera sig inom det. I början av 2020 startade SIS därför en arbetsgrupp för standardisering av grafen för att kunna arbeta mer fokuserat på grafen och andra 2D-material. I rapporten pekas även de standarder och tekniska specifikationer som det arbetas på inom SIS och IEC ut.

Det har i dagsläget publicerats fem standarder direkt relaterade till grafen. En av dessa ger en översikt över grafens egenskaper och med vilka karakteriseringsmetoder dessa kan undersökas, medan en annan standard definierar vokabulären kring grafen och en del andra två-dimensionella material, sammanfattad i Tabell 2. De övriga tre är tekniska specifikationer av olika karakteriseringsmetoder. Dessa och ytterligare standarder och tekniska rapporter som det arbetas på inom ISO och IEC är listade i bilagan Standarder samt i en [rapport](#)¹⁷ på SIO Grafens hemsida. De flesta andra standarder och tekniska specifikationer som är under utveckling handlar om karakterisering av grafen med olika metoder.

Tabell 2 Nomenklaturen kring grafen. Översatt och sammanfattad från standard ISO/TS 80004-13:2017.

Namn	Definition
Tvådimensionellt material 2D-material	Material bestående av ett eller flera lager, där atomerna i varje lager är starkt bundna till angränsande atomer inom samma lager. En dimension (tjockleken) av detta lager är i nanoskala medan de andra två dimensionerna generellt är i större skala.
Grafen Enlayersgrafen	Ett lager av kolatomer där varje atom är bunden till 3 andra i en hexagonal struktur.
Bilayersgrafen Tvålayersgrafen	Tvådimensionellt material bestående av två väldefinierade staplade grafenlager.
Fålayersgrafen	Tvådimensionellt material bestående av tre till tio väldefinierade staplade grafenlager.
Grafenoxid	Kemiskt modifierad grafen tillverkad genom oxidering och exfoliering av grafit. Har generellt ett atomärt förhållande kol till syre på omkring 2.
Reducerad grafenoxid	Reducerad form av grafenoxid. Vid fullkomlig reduktion av grafenoxid skulle grafen produceras. I praktiken lämnas alltid några syregrupper kvar och defekter bildas i strukturen.

¹⁷ U. Haraldsson, L. Hologård, V. López Durán, J. Ek Weis och Å. Hartmanis. Standardisering och best practice för nya nanomaterial - Fallstudier grafen och nanocellulosa. (2020)

Graphene nanoplate / nanoplatelet GNP	GNP är enligt standarden generellt 1-3 nm tjocka och har en lateral storlek på ungefär 100 nm till 100 µm. Uttrycket GNP används dock ibland även om tjockare material.
--	---

Grafenoxid kan också innehålla betydligt mer syre än enligt tabellen ovan. Det finns ingen tydligt definierad gräns för vid vilken syrehalt materialet karakteriseras som grafen, reducerad grafenoxid eller grafenoxid. På liknande sätt finns ännu inga definitioner kring vokabulär för grafen med olika lateral storlek, defekter, etc.

SIO Grafen har tidigare använt en förenklad version av denna tabell där fålagsgrafen refererar till material med 2-10 atomlager. Ordet grafen har också ofta använts för att täcka in hela familjen av grafenmaterial med upp till tio väldefinierade staplade lager.

Större investeringar i forskning och utveckling med fokus på grafen

Det finns ett antal satsningar för att främja grafenutvecklingen både i Sverige och runt om i världen.

[SIO Grafen](#) är ett svenskt strategiskt innovationsprogram som arbetar för att svenska företag ska bli världsledande på att utnyttja grafen. Programmets mål är att etablera grafen som ett industriellt styrkeområde, stärka samverkan och leverantörskedjor, stimulera svensk grafentillverkning och bidra till ett hållbart samhälle. Sedan starten 2014 har 98 projekt finansierats, 140 organisationer och 60 små och medelstora företag har deltagit.

Våren 2020 startade Chalmers Tekniska Högskola (Sverige) ett nytt centrum för forskning om tvådimensionella material som kallas [2D-TECH](#). Centrumet kommer att fokusera på teknologi baserad på tvådimensionella material inom flera olika applikationsområden för svensk industri, såsom energitillämpningar, multifunktionella kompositier och högfrequenselektronik. Totalt är 17 Chalmersforskare från sex olika institutioner och 16 olika företag längs värdekedjan knutna till centrumet.

[Graphene Flagship](#) startade 2013 och är ett av EU: s största vetenskapliga forskningsinitiativ någonsin med en budget på en miljard euro över tio år. Genom ett kombinerat akademiskt-industriellt konsortium täcker forskningsinsatserna hela värdekedjan, från materialproduktion till komponenter och systemintegration och inriktar sig på ett antal specifika mål som utnyttjar grafens unika egenskaper. Det är ett slutet konsortium med ungefär 150 partners (nästan hälften av dem från industrin), 31 partnerskapsprojekt och nästan 100 associerade medlemmar.

I slutet av 2018 lanserade Graphene Flagship [Validation Service](#), ett nytt kvalitetssäkringsprogram för grafen och andra skiktade material. Tjänsten säkerställs av tre partners; National Physical Laboratory (NPL, Storbritannien), Universidad de Zaragoza (Spanien) och Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE, Frankrike). Programmet syftar till att ge förtroende för materialen och möjliggöra en snabbare introduktion av grafenprodukter på marknaden. Tjänsten är

gratis för Graphene Flagships partners men kan anlitas av kunder utanför projektet till marknadspris.

Nästan alla grafentillämpningar inom elektronikområdet kräver storskalig produktion, överföring och integration av enlagersgrafenen av hög kvalitet. Ett konsortium lett av Interuniversity Microelectronics Centre (IMEC) bildades av Graphene Flagship under 2020 för att inrätta en experimentell pilotlinje (EPL) med syfte att överbygga grundläggande och tillämpad forskning om grafen och andra 2D-material för utveckling av integrerad kretsteknik. Budgeten ligger på nästan 20 miljoner euro och konsortiet arbetar med grafenbaserad elektronik, optoelektronik och sensorer^{18,19}. Målet är att föra tekniken från teknikberedskapsnivå (TRL) 3 till TRL 7-8 på fyra år.

[National Graphene 2D Association](#) (NGA2D) är den ledande organisationen i USA som förespråkar och främjar kommersialisering av grafen och grafenliknande material. De omstrukturerades nyligen och organiserar nu mest konferenser och bedriver lobbyverksamhet. I motsats till Europa finns ingen storskalig finansiering av grafenforskning och innovationsprojekt i USA.

I Kina finns två konsortier med målen att främja grafeninnovationer. [China Innovation Alliance of the Graphene Industry](#) (CGIA) är ett vetenskapligt innovationskonsortium som syftar till att förbättra industriteknologiska innovationer relaterade till grafen. [China International Graphene Industry Union](#) (CIGIU) är mer industrifokuserat och syftar till att skapa en plattform för internationellt samarbete för att främja utvecklingen av den globala grafenindustrin.

I Malaysia har NanoMalaysia etablerat ett kommersialiseringsprogram kallat [National Graphene Action Plan](#). De lanserades 2014 och knyter samman industrier, universitet och forskningsinstitut med fokus på grafen-tillämpningar inom energi, ledande bläck, gummi samt plastadditiv och nanofluidier.

Det finns även ett antal centra i olika länder som antingen helt eller till stor del arbetar med grafen och andra 2D-material. En lista över några av de större finns som en bilaga.

¹⁸ SGA-FET-GRAPHENE-2-2019 - Experimental pilot line for devices based on graphene, related 2d materials and heterostructures. (2019). Available at: <https://cordis.europa.eu/programme/rcn/705007/en>.

¹⁹ Milana, S. The lab-to-fab journey of 2D materials. *Nat. Nanotechnol.* Vol.14, sid. 919–921 (2019).

Svenska testbäddar och pilotanläggningar

Många nya produkter behöver utvecklas och verifieras i test- och demomiljöer innan de skalas upp i högvolymproduktion. En sådan miljö är testbäddar som är frikopplade från de traditionella leverantörskedjorna, och som ska främja samverkan inom forskning mellan universitet, högskolor och industri. Syftet är att hjälpa industrin att testa materialegenskaper för nya produkter och systemlösningar. Det finns även olika pilotanläggningar vars uppdrag är att underlätta steget ut i storskalig produktion.

I Sverige finns inga testbäddar eller pilotanläggningar som fokuserar på grafen, däremot finns möjligheter att utnyttja redan etablerade testbäddar inom vissa tillämpningar. [Testbed Sweden](#) har en lista över testbäddar inom RISE och Swerim som är i drift i dag.²⁰ Vinnova har också sammanställt [information om testbäddar](#) i allmänhet, rapporter inom området och en lista över testbäddar i landet.²¹

Det finns ett antal områden och testbäddar som drivs av RISE där grafenutveckling skulle kunna passa in och som svenska grafenaktörer skulle kunna använda för test och verifiering:

- Kompositmaterial

[LIGHTest](#) är en testbädd främst för materialutveckling av framtidens lättviktsmaterial, där SIO Grafen ingår i styrgruppen. Några övriga testbäddar inom kompositmaterial är [Framtidens hållbara material](#) (Borås), [Additiv tillverkning](#) (Region Jönköping län), [Kompositteknologi](#) (Öjebyn), [Pulvermetallurgi](#) (Kista) och [Extruderpark](#) (Stockholm).

- Barriärer och ytbeläggningar

Det finns en testbädd för [Barriärmaterial](#) (Stockholm) och en för organiska och oorganiska ytbehandlingsprocesser ([Paint center](#) i Mölndal).

²⁰ <https://www.testbedsweden.se>

²¹ <https://www.vinnova.se/m/testbadd-sverige>

- Elektronik

Det finns två testbäddar för elektronik: [Electrumlaboratoriet](#) (Kista), [PEA-Manufacturing](#) (Norrköping). RISE Acreo är också en intressant aktör i området.

- Textilier

I Sverige arbetas det en hel del med textilutveckling, speciellt i Borås med Smart Textiles och textilhögskolan, och i Mölndal, där bland annat testbäddarna [Textilfiberutveckling](#) och [Provning och kemisk analys av textilier](#) finns.

- Karakterisering

Det finns en testbädd för [Ytanalys och ytdesign](#) (finns i Region Kronoberg, Region Stockholm och Västra Götalandsregionen).

- Cellulosa och nanocellulosa

Nanocellulosa är liksom grafen en stor materialfamilj med olika tillverkningsmetoder, egenskaper och tillämpningar. En skillnad mellan materialen är dock att det finns många små tillverkare av grafen medan det främst är stora företag etablerade inom pappersindustrin som tillverkar nanocellulosa. En annan stor skillnad är att forskningen och utvecklingen av grafen sker globalt i många länder medan utvecklingen av nanocellulosa främst ligger i Norden och Kanada.

Testbäddarna [Nanocellulosa pilot \(Stockholm\)](#), [TinyBTalented](#) (Örnsköldsvik) och [FEX](#) (Stockholm) samt kompetenscentrumet [Digital Cellulose Center, DCC](#) (drivs av RISE Acreo) kan nämnas bland några.

- Övriga

[Transparenta material](#) (Växjö) är en testbädd med fokus på transparenta materiallösningar.

Grafen och hälsa

Industriell tillverkning innebär förutom tekniska utmaningar även att eventuella risker för hälsa och miljö måste säkerställas. För företag inom EU gäller främst lagar och förordningar som sammanställs av [REACH](#) (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals). Policyn är "No data, no market", vilket innebär att REACH lägger ansvaret på industrin att hantera kemiska risker och tillhandahålla säkerhetsinformation. Tillverkare och importörer har ansvar för att samla information om egenskaperna av deras kemiska ämnen och hur de ska hanteras för att garantera användarnas säkerhet. Informationen samlas i en central databas hos European Chemicals Agency ([ECHA](#)) i Helsingfors.

Det finns inga specifika förordningar gällande grafen, men för grafen och andra 2D-material gäller att de klassas som nanomaterial. Från 1 januari 2020 krävs att specifik information om nanomaterial registreras hos ECHA för att demonstrera säker hantering för hälsa och miljö. Danmarks Tekniske Universitet arbetar med att ta fram en sökbar online-databas med aktuella EU-regler och lagar som kan vara till hjälp för framförallt små och medelstora företag. De har även publicerat '[de tio budorden](#)'²² gällande handhavande av nanomaterial för att förenkla förståelsen av regelverket samt öka medvetandet hos användarna. Det finns dock fortfarande en stor osäkerhet över vilka analysmetoder som bör tillämpas samt klassificeringen av olika material. En utmaning är att grafen inte är ett enhetligt material utan kan anta många olika former och därmed kräver mer undersökningar när det kommer till säkerhetsaspekterna.

Rapporten '[Safety and regulation of graphene](#)' publicerades förra året på uppdrag av SIO Grafen. Den innehåller en överblick av regler kring säkerhetsrapportering av tillverkning och användning av nanomaterial (grafen). En uppdaterad sammanställning av forskningsläget kring hälsoaspekter av produktion med grafen och grafenproduktion kommer att publiceras av SIO Grafen under hösten 2020.

²² L.P. W. Clausen och S.F. Hansen The ten decrees of nanomaterials regulations. Nature Nanotech vol. 13, sid. 766–768 (2018).

Bilagor

Internationella centra med fokus på grafen

I Manchester (Storbritannien) har flera centra skapats för att öka tekniköverföringen mellan universitet och industri. 61 miljoner pund har investerats i [National Graphene Institute](#) (NGI) för att arbeta brett med grafen. Fokus ligger på konceptutveckling, ett steg bort från akademi mot industri, men även standardisering, kvalitetskontroll och hälsofrågor undersöks. I Manchester ligger även [Graphene Engineering Innovation Centre](#) (GEIC) där det också har investerats cirka 60 miljoner pund. GEIC är ett steg längre mot industrin, har högre TRL än NGI och fokuserar på tillämpningar inom kompositmaterial, energi, membran och bläck.

[Cambridge Graphene Centre](#), som också ligger i Storbritannien, syftar till att utöka vetenskapen och tekniken för grafen och liknande nanomaterial. Centret har som ambition att brygga gapet mellan universitet och industri främst för grafentillämpningar inom flexibel (opto)elektronik. Här fokuserar man på tillverkning, energi, kommunikation och detektorer.

[AMO](#) (Tyskland) fokuserar på mikro- och optoelektronik. De vill ta tillämpningar från proof-of-concept-demonstrationer till slutliga tekniska lösningar och fungerar som en leverantör av forsknings- och tillverkningstjänster inom området nanofabrikation. AMO har fyra fokusområden, varav ett är grafen.

Baserat på Istituto Italiano di Tecnologia (IIT, Italien) syftar [Graphene Labs](#) (G@IIT) att utveckla tvådimensionella material, både för att utforska grundläggande fysikaliska fenomen och för att ta fram tekniska lösningar inom olika tillämpningar. Aktiviteterna fokuserar på materialproduktion och energitillämpningar, men undersöker även kompositmaterial, optoelektronik och bioteknologi. Från IIT skapades spin-off-företaget BeDimensional som efter en tvåårig "inkubations"-period inom institutet flyttade ut på marknaden i början av 2018.

[Institute of Photonic Sciences](#) (ICFO, Spanien) är ett forskningscenter som ägnas åt fotonik, det vill säga vetenskap och teknik baserat på ljus. Grafen är ett av deras fokusområden.

[Interuniversity Microelectronics Center](#) (IMEC, Belgien) är ett internationellt centrum för forskning och utveckling samt innovation. Centret är verksamt inom nanoelektronik och digital teknik. IMEC arbetar för att designa komponenter baserade på tvådimensionella material (som grafen och WS₂), integrera dem i en 300 mm plattform och optimera deras prestanda.

Dessa är några av de viktigaste centrumen i Europa men listan bör inte ses som uttömmande. Många av aktörerna ovan är viktiga även inom Graphene Flagship och det är tydligt att optoelektronik utöver olika kompositmaterial ses som viktiga spår inom grafenutvecklingen i Europa.

[Center for Advanced 2D Materials](#) (CA2DM) från National University of Singapore (Singapore) skapades för design, karakterisering, teoretisk modellering och utveckling av transformativa tekniker baserade på tvådimensionella material, såsom grafen. Centrumets mål är att vara världsledande inom innovativ och framväxande materialvetenskap med starka band till industrin och akademien.

[MackGraphe](#), Graphene and Nanomaterials Research Center från Mackenzie Presbyterian University (Brasilien), är ett centrum som påminner om CA2DM ovan och arbetar på ett komplementärt sätt. Centret syftar till att behärska processer i alla stadier av teknologikutveckling, från modellering av nanomaterial till deras tillämpning, syntes, karakterisering och integration med andra element.

De klart flesta grafitfyndigheterna finns i Kina, men även Brasilien har en relativt stor andel. Projektet MGgrafeno, som drivs av CODEMGE, tillsammans med CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear) och UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) ämnar utnyttja Brasiliens resurser för att möjliggöra en marknad med grafenbaserade produkter.

KAIST-institutet (KI, Sydkorea) grundades 2006 och syftar till att lösa kritiska problem för människans framtid samt att utveckla nya tillväxtmotorer för den koreanska ekonomin. Ett av dess institut, [KI för NanoCentury](#), inkluderar Graphene/2D Materials Research Center, med ett mål att utföra tvärvetenskaplig forskning om 2D-material. Fokus ligger på utvecklingen av den senaste tekniken för syntes av högkvalitativa 2D-material och effektiv kontroll av deras egenskaper för elektronik, optoelektronik och energitillämpningar.

I Ryssland är grafen ett prioriterat forskningsområdena, där forskningen främst bedrivs vid den ryska vetenskapsakademien (RAS) som har flera institut spridda över landet. Fokus ligger på elektronik, fotonik, spintronik, optoelektronik, bioelektronik samt storskalig produktion av grafen.²³

²³ Grachev, V. och Gubin, S. Graphene in Russia: The Main Centres, Research Areas, Results. *Advanced Materials Letters* **10**, 855 (2019).

Standarder

Publicerade standarder

- ISO/TS 80004-13:2017 - Nanotechnologies — Vocabulary — Part 13: Graphene and related two-dimensional (2D) materials
- ISO/TR 19733:2019 - Nanotechnologies — Matrix of properties and measurement techniques for graphene and related two-dimensional (2D) materials
- IEC TS 62607-6-1:2020 - Nanomanufacturing - Key control characteristics - Part 6-1: Graphene-based material - Volume resistivity: four probe method
- IEC TS 62607-6-4:2016 - Nanomanufacturing - Key control characteristics - Part 6-4: Graphene - Surface conductance measurement using resonant cavity
- IEC TS 62607-6-13:2020 - Nanomanufacturing - Key control characteristics - Part 6-13: Graphene powder - Oxygen functional group content: Boehm titration method

Standarder under utveckling med förutsagt publiceringsår enligt IEC²⁴:

Förutsagd publikation under 2020

- IEC TS 62607-6-10: Nanomanufacturing - Key control characteristics - Part 6-10: Graphene film - Sheet resistance: Terahertz time-domain spectroscopy
- IEC TS 62607-6-14: Nanomanufacturing – Key control characteristics – Part 6-14: Graphene powder – Defect level: Raman spectroscopy
- IEC TS 62607-6-3: Nanomanufacturing - Key control characteristics - Part 6-3: Graphene material – Domain size: Surface oxidation

Förutsagd publikation under 2021

- ISO TS 21356-1: Nanotechnologies - Structural characterization of graphene -- Part 1: Graphene from powders and dispersions

²⁴ https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:23:14118545645388:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:1315,25

- IEC TS 62607-6-5: Nanomanufacturing - Key control characteristics - Part 6-5: Graphene materials - Contact and sheet resistance: Transfer length method
- IEC TS 62607-6-6: Nanomanufacturing - Key control characteristics - Part 6-6: Graphene - Uniformity of strain analyzed by spatially-resolved Raman spectroscopy
- IEC TS 62876-3-1: Nanomanufacturing - Reliability assessment - Part 3.1: Graphene materials - Stability test: Temperature and humidity
- IEC TS 62607-6-9: Nanomanufacturing - Key control Characteristics - Part 6-9: Graphene material – Sheet resistance: Eddy current method
- IEC TS 62607-6-19: Nanomanufacturing - Key control characteristics - Part 6-19: Graphene powder - Elemental composition: CS analyzer, ONH analyzer
- IEC/TS 62565-3-2: Nanomanufacturing - Material specifications - Part 3-2: Graphene - Sectional blank detail specification for nano-ink
- IEC TS 62607-6-2: Nanomanufacturing – Key control characteristics – Part 6-2: Graphene – Evaluation of the number of layers of graphene
- IEC 62565-3-1: Nanomanufacturing - Material specifications - Part 3-1: Graphene - Blank detail specification
- IEC TS 62607-6-21: Nanomanufacturing - Key control characteristics - Part 6-21: Graphene Powder – Elemental composition, C/O ratio: XPS
- IEC TS 62607-6-11: Nanomanufacturing - Key control characteristics - Part 6-11: Graphene film - Defect density: Raman spectroscopy
- IEC TS 62607-6-20: Nanomanufacturing - Key control characteristics - Part 6-20: Graphene powder - Metallic impurity content: ICP-MS

Förutsagd publikation 2022-23

- PNW TS 113-497 - Nanomanufacturing - Key control characteristics - Part 6-12: Graphene film – Number of layers: Raman spectroscopy, optical reflection
- IEC TS 62607-6-8: Nanomanufacturing – Key control characteristics – Part 6-8: Graphene based material – Sheet resistance: In-line four-point probe
- IEC TS 62607-6-7: Nanomanufacturing – Key control characteristics – Part 6-7: Graphene based material – Sheet resistance: van der Pauw method