



 SIO GRAFEN

Färdplan Energi Grafen för energitillämpningar i Sverige 2020-2030

**Ingrid Nyström och Malin Jacobsson
CIT Industriell Energi AB**

2020

Med stöd från

VINNOVA
Sveriges innovationsmyndighet

 **Energimyndigheten**

FORMAS 

**Strategiska
innovations-
program**

Sammanfattning

Denna rapport presenterar en färdplan för användning av grafen och andra 2D-material för energitillämpningar – Färdplan Energi. Färdplanen har tagits fram av CIT Industriell Energi på uppdrag av det Strategiska innovationsprogrammet för grafen (SIO Grafen), en gemensam satsning av Vinnova, Formas och Energimyndigheten. Arbetet har genomförts i samverkan med en referensgrupp inom SIO Grafen och genom flera aktiviteter öppna för alla svenska aktörer.

Färdplanen beskriver mål, prioriteringar samt insatser och aktiviteter och baseras på kunskap om nuläge, teknisk och ekonomisk potential samt vilka aktörer som finns inom området. Tidsperspektivet omfattar perioden 2020-2030 för färdplanen som helhet, men med konkreta förslag till aktiviteter för perioden 2020-2025, vilket motsvarar tidsperspektivet i Agenda SIO Grafen. Färdplanen har inriktats särskilt mot områden som är relevanta för svensk industri.

Färdplanen täcker tillämpningar som har potential att utvecklas genom användning av *grafen* - genom att dess unika egenskaper kan bidra till kostnads- och/eller energieffektivisering – har hög *energirelevans* och därmed bidrar till att uppnå energimålen, samt har hög relevans för *energibranschen*.

Grafen har potential att användas för att förbättra prestandan i ett betydande antal olika teknologier och tillämpningar inom energiområdet. Förslaget är att framåt prioritera fem områden - *elfordon, lagring av el och balansering av elnät, värmepåbyggnader och annan värmeöverföring, krafttransmission och distribution samt motorer, generatorer och turbiner*. De övriga tillämpningar som tas upp är termiska energilager, förnybar elproduktion, vätgas samt CO₂-avskiljning och avskiljning av andra gaser.

Färdplanen föreslår också såväl *övergripande* som mer *tillämpningsspecifika mål* för utveckling av grafen inom energiområdet, till år 2030 och till år 2025. Målen omfattar både mål kopplade direkt till industriell utveckling – som t ex genomförande av pilotanläggningar – som kunskaps- och samverkansmål.

Föreslagna aktiviteter berör olika aktörer, som SIO Grafen och andra samlande forskningsaktörer, myndigheter och industriella aktörer. Aktiviteterna har delats in i *kunskapsspridning, nätverksbyggande, fortsatt kunskapsuppbyggnad, standardisering samt utveckling av forskningsinriktning*.

Innehåll

Sammanfattning	2
Innehåll	3
1 Introduktion	5
1.1 Uppdraget – vad är en färdplan?	5
1.2 Färdplanens avgränsningar	6
1.3 Rapportens upplägg	8
2 Nuläge	8
2.1 Användning av grafen i industrin	9
2.2 Forsknings- och innovationsprojekt	10
3 Potential – grafen i energitillämpningar	12
4 Vägen fram – mål och prioriteringar	16
4.1 Underlag och samverkan	17
4.2 Prioriterade områden	17
4.3 Mål	20
4.4 Framgångsfaktorer	22
4.5 Insatser och aktiviteter	23
5 Några nyckelteknologier för grafen i energitillämpningar	27
5.1 Grafen som material	27
5.1.1 Grafens egenskaper	27
5.1.2 Tillverkning av grafen	28
5.2 Batterier	29
5.3 Superkondensatorer	31
5.4 Bränsleceller	32
5.5 Solceller	33
5.6 Vätgas – produktion och lagring	34
5.7 Gasseparation	35
6 Potential för energitillämpningar	35
6.1 Elfordon	36
6.1.1 Marknad och grafens potentiella roll	36

6.1.2 Teknisk potential och status	38
6.1.3 Energirelevans	39
6.2 Lagring av el och balansering av elnät	40
6.2.1 Marknad, energirelevans och grafens potentiella roll	40
6.2.2 Teknisk potential och status	41
6.3 Termiska energilager	41
6.3.1 Marknad, energirelevans och grafens potentiella roll	41
6.3.2 Teknisk potential och status	42
6.4 Förnybar elproduktion	43
6.4.1 Marknad och grafens potentiella roll	43
6.4.2 Teknisk potential och status	44
6.5 Värmeväxlare och annan värmeöverföring	44
6.5.1 Marknad, energirelevans och grafens potentiella roll	44
6.5.2 Teknisk potential och status	46
6.6 Krafttransmission och distribution	47
6.6.1 Marknad och grafens potentiella roll	47
6.6.2 Teknisk potential och status	48
6.7 Motorer, generatorer och turbiner	49
Bilagor	51
A. SIO Grafens forskningsprojekt inom styrkeområde energi	51
B. Anteckningar från workshop I	53
C. Anteckningar från workshop II	54
D. Enkät och enkätresultat	56

Del I – Färdplan Energi

1 Introduktion

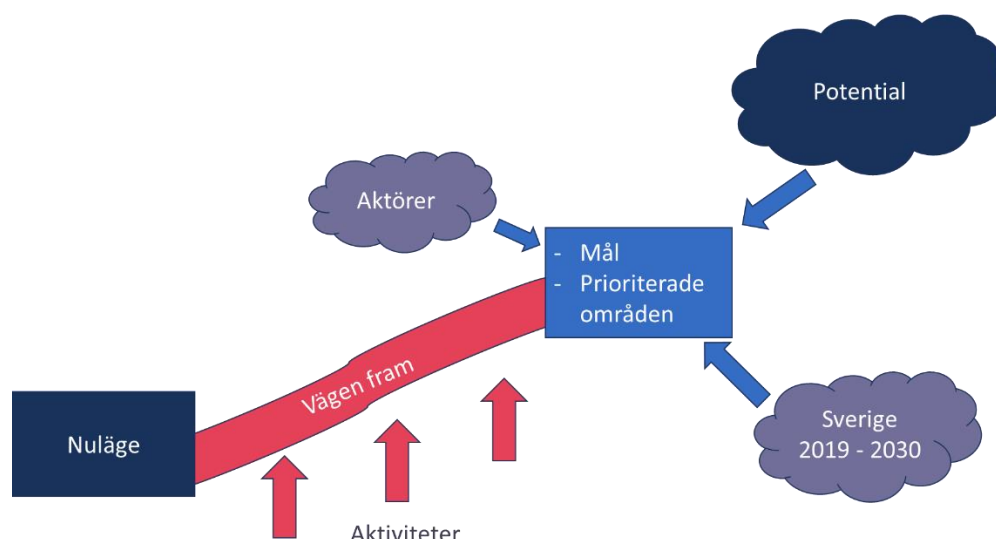
SIO Grafen är ett strategiskt innovationsprogram som stödjer industriell utveckling av grafen och andra så kallade 2D-material i Sverige. Programmet stöds av Vinnova, Energimyndigheten och Formas. Programmet har identifierat sex olika styrkeområden, som tillsammans utgör fokus inom grafenområdet. I de aktiviteter som bedömts nödvändiga för att uppnå programmets mål ingår utveckling av svenska färdplaner för dessa styrkeområden. Under 2017 färdigställdes en färdplan för området Kompositer och ytbeläggningar och under 2019 en för området Elektronik.¹

Denna rapport är resultatet av ett motsvarande färdplansarbete för område Energi. Studien har genomförts av CIT Industriell Energi på uppdrag av SIO Grafen/Vinnova med stöd av en referensgrupp inom SIO Grafen. Referensgruppen har utgjorts av Henrik Hillborg, ABB; Olga Santos, Alfalaval; Sven Forsberg, 2D fab; Göran Bolin, SaltXtechnology; Mikael Lindqvist, Energimyndigheten och Johan Ek Weis, SIO Grafen/Chalmers Industriteknik.

1.1 Uppdraget – vad är en färdplan?

Projektet syftar till att ta fram en färdplan för användning av grafen och andra 2D-material för energitillämpningar i Sverige. Eftersom forskning och utvecklingen av grafen kommit betydligt längre än för andra 2D-material så fokuserar beskrivningen i rapporten till övervägande del på grafen och i vissa fall används ordet ”grafen” som förenklande begrepp för grafen och andra grafenliknande material. Även andra 2D-material är dock av intresse.

¹ Dahlen, L. et al, Grafen: En svensk roadmap – Kompositer & Ytbeläggningar, mars 2017 respektive Zirath H et al, Graphene Roadmap Electronics, May 2019



Figur 1.1 Färdplanen består primärt av en beskrivning av mål och prioriteringar samt vilka insatser och aktiviteter som krävs för att uppnå dessa mål.

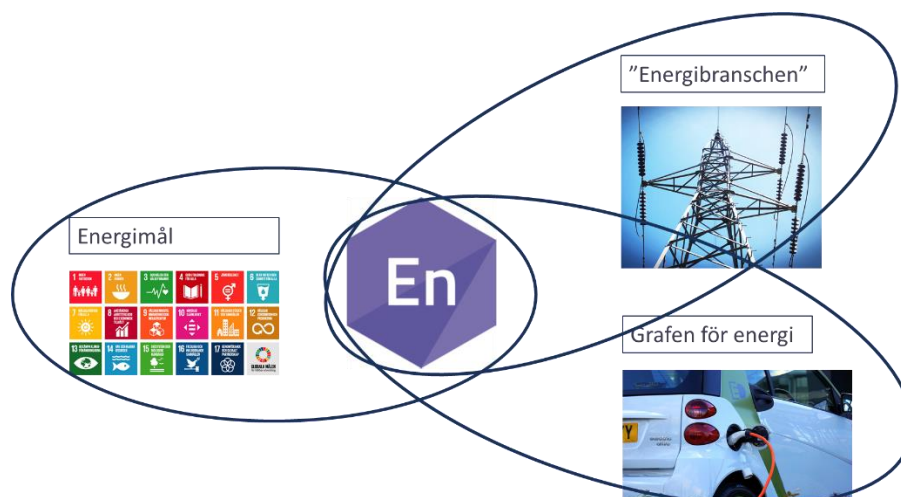
Färdplanen består primärt av en beskrivning av mål och prioriteringar samt vilka insatser och aktiviteter som krävs för att uppnå dessa mål, inom ett specificerat tidsperspektiv.

Färdplanens utveckling baseras på kunskap om nuläge, teknisk och ekonomisk potential samt vilka aktörer som finns inom området (se Figur 1.1).

Tidsperspektivet i den här färdplanen omfattar primärt de närmsta åren (1-5 år), men med en utblick för de kommande 10 åren, vilket innebär perioden 2020-2030. Den bakomliggande analysen, liksom inriktningen mot olika prioriterade områden och formuleringen av mål har fokuserat på möjligheterna fram till 2030. Däremot omfattar de konkreta förslagen till aktiviteter perioden 2020-2025, vilket motsvarar tidsperspektivet i Agenda SIO Grafen. Färdplanen har också tagits fram ur ett svenskt perspektiv. Detta innebär att färdplanen inriktas särskilt mot de områden som är relevanta för svensk industri och där svenska aktörer har möjlighet att påverka utvecklingen (inklusive insatser på internationell nivå).

1.2 Färdplanens avgränsningar

Vad som ingår i användning av grafen för energitillämpningar är inte självklart. I den här färdplanen ingår tillämpningar som har hög *energirelevans*, på så sätt att den bidrar till att uppnå energimålen, har hög relevans för den industri som har sin verksamhet inom energiområdet (*energibranschen*) och har potential att utvecklas genom användning av *graf*en, genom att dess unika egenskaper kan bidra till kostnads- och/eller energieffektivisering (se Figur 1.2).



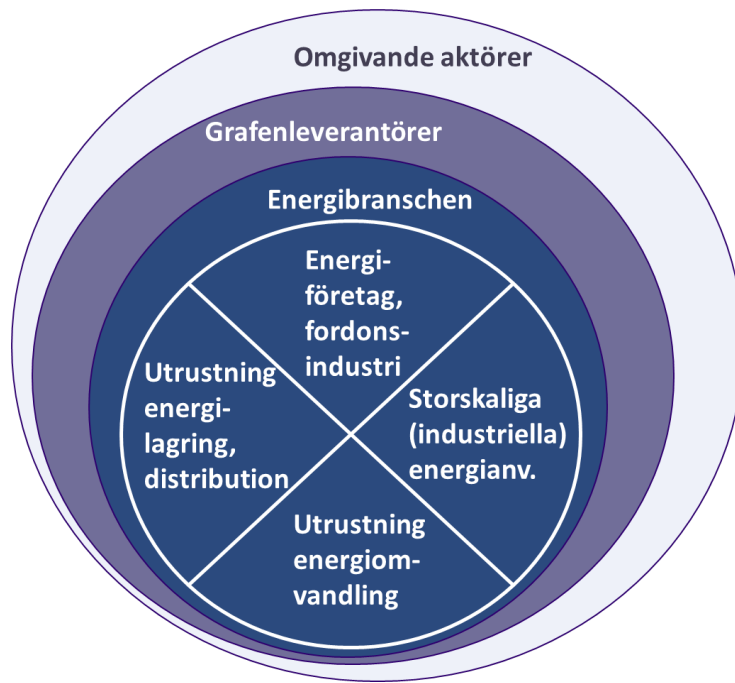
Figur 1.2 Färdplanen omfattar energitillämpningar med hög relevans för energimålen och energibranschen, där användning av grafen är relevant och kan bidra i betydande utsträckning.

En mycket stor andel av alla tillämpningar av grafen har energirelevans. Grafens egenskaper, som hög styrka, gör till exempel att material kan göras lättare. God elektrisk ledningsförmåga kan bidra till effektivare energianvändning i elektronik. I det här färdplansarbetet ligger dock fokus på energitillämpningar som har energirelevans i industriell skala, dvs relativt *storskaliga* tillämpningar.²

Den avgränsning vi här använt för *energibranschen* framgår av Figur 1.3. Transportrelaterad industri (fordonsindustri) ingår genom att vi inkluderar energiförsörjningen av fordonen (f.a. batterier för eldrift). Energibranschens omgivande aktörer är avgörande för energitillämpningarnas möjlighet att utvecklas, men ingår inte direkt i "branschen".

Styrkeområde Energi inom SIO Grafen har hittills indelats i två fokusområden: lagring och generering, respektive termisk och elektrisk ledning. I andra satsningar, som t ex Graphene Flagship i samband med grafenkonferenser och i litteraturen görs en liknande avgränsning av energiområdet. Våra avgränsningar innebär alltså ett tydligt industriellt perspektiv och därmed en något bredare syn på relevanta energitillämpningar.

² Var gränsen för stor skala går är svårt att entydigt bestämma, men ett exempel kan vara att batterier av den storlek som krävs för elektrisk fordonsdrift inkluderas, men inte batterier för produkter som mobiltelefoner och annan elektronik.



Figur 1.3 Definition av energibranschen för användning i den här färdplanen. Omgivande aktörer omfattar t ex underleverantörer av komponenter, materialleverantörer, forskningsorganisationer, konsumentorganisationer och myndigheter.

Slutligen omfattar färdplanen enbart sådana teknologier och tillämpningar där användning av *grafen*, eller andra 2D-material, har potential att öka prestandan på något avgörande sätt. Karaktäristiskt för 2D-material är deras särskilda egenskaper, vilka dessutom kan kombineras, så att egenskaper som annars ses som oförenliga i vanliga, tredimensionella material kan fås samtidigt. De särskilda egenskaperna hos grafen är att det är starkt, har hög termisk och elektrisk ledningsförmåga, böjbart, har hög transparens, är ogenomträngligt för gaser, har stor yta i förhållande till vikt och goda tribologiska egenskaper (friktion, nötning och smörjning). För mer information om grafen som material, se vidare Avsnitt 5.1.

1.3 Rapportens upplägg

Rapporten är uppdelad i två delar. Del I omfattar den egentliga färdplanen utifrån nuläge, potential och vägen fram – vilka mål, prioriteringar och faktiska aktiviteter som föreslås. Del II innehåller en mer detaljerad genomgång av potentialen för användning av grafen inom ett antal nyckelteknologier för energiområdet och energitillämpningar. Denna genomgång har använts som utgångspunkt för rekommendationerna inom färdplanen.

2 Nuläge

Nulägesbeskrivningen fokuserar på situationen i Sverige och utgår från ett industriellt perspektiv. Skälet är framför allt att färdplanen avser svensk industri och svenska aktörer.

2.1 Användning av grafen i industrin

Dagens användning av grafen inom energirelaterade tillämpningar är mycket begränsad. Det finns få exempel på där grafen idag används helt kommersiellt, men något fler som ligger relativt nära kommersialisering och där pilot- och demonstrationsprojekt i mer eller mindre industriell skala pågår eller är under uppstart.

Av Graphene Flagship (se vidare avsnitt 2.2.) lyfts framför allt industriella projekt på TRL-nivå 4-9 fram inom utveckling av knappbatterier av LiB-typ och polymera batterier för användning i tillämpningar av typen E-bikes och drönare samt utveckling av superkondensatorer och hybrid-superkondensatorer. De senare uppges ligga på upp till TRL 7-8 även för användning i större skala inom energibranschen, som till exempel fordon (elbilar och flyg), balansering av elnät och inom industrin. Exempel på viktiga industriella aktörer för denna utveckling är Skeleton Technologies (Estland) och ZapGo (UK). Åtminstone Skeleton har grafen-förbättrade superkondensatorer som del av sitt kommersiella produktsortiment. Bland annat ska dessa, enligt ett femårigt avtal, levereras till hybrid-elbussar, som produceras av Wrights Group.³ Thales är ett annat företag som utvecklat en superkondensator med grafen för i första hand rymd- och flygindustrin samt, tillsammans med företaget M-SOLV, industriell produktionsteknik för sådana. Man bedömer att en operationell prototyp kommer att tas fram till omkring 2020.⁴

Smörjningsrelaterad utveckling av grafenanvändning har kommit långt inom flytande smörjmedel och ligger där på TRL 8-9. En viktig aktör är där Graphene NanoChem. Även vissa ledande beläggningar är nära kommersialisering liksom membran för filtrering av vätskor. Som färdig produkt finns slutligen en luftkonditioneringsenhet från Nanesa, som enligt uppgift har en verkningsgrad som är 50% högre än konventionella system.⁵

Industrier i Sverige som varit aktiva för utveckling av industriella energitillämpningar av grafen är dels producenterna av grafenmaterial (2D fab, Graphensic, Graphmatech och Talga Resources), dels företag inom energi-branschen (enligt vår definition ovan). Exempel på de senare är ABB, Vattenfall, AlfaLaval, SaltXtechnologies, Valmet och Ahlstrom-Munksjö Paper. Det är också dessa industrier som främst varit involverade i de FoI-projekt som finansieras genom SIO Grafen. Inget av dessa företag har dock idag någon kommersiell produkt med grafen eller någon större pilot- eller demonstrationsanläggning.

³ Skeleton Technologies hemsida, www.skeletontech.com (hämtat 2019-12-10).

⁴ Graphene Flagships hemsida, nyhet publicerad 2018-12-12 (hämtat 2019-12-05).

⁵ Graphene Flagships hemsida, 2019-10-28

2.2 Forsknings- och innovationsprojekt

Den totala grafenforskningen är omfattande, men har till övervägande del tämligen grundläggande inriktning. Tillämpad forskning i samverkan med industrin och med tydlig energiinriktning, utifrån de avgränsningar som specificerats ovan, genomförs i Sverige till stor del inom SIO Grafen. Inom SIO Grafen finns forskningsprojekt kopplat till grafen i högspänningssystem, superkondensatorer, litiumjonbatterier, smörjning av lager i vattenkraft och termisk energilagring. För en fullständig lista av FoI-projekt inom SIO Grafen som kategoriserats som relaterade till Styrkeområde Energi, se Bilaga A.

Det finns, bland annat genom EU:s flaggskeppsprojekt Graphene Flagship, som koordineras av Chalmers (se nedan), flera starka svenska lärosäten inom grafenforskning generellt. En sökning i databasen Web of Science visar dock att det absoluta flertalet är av mer grundforskningskaraktär, eller knutna till andra tillämpningsområden (se Tabell 2.1).⁶ Denna sökning tyder på att forskning knuten till batterier och superkondensatorer inom framför allt Chalmers, KTH, Uppsala universitet och Umeå universitet dominerar, följt av forskning om grafen i solceller. Utöver de lärosäten som tas upp i tabellen har Luleå tekniska universitet forskning knutet till grafens smörjande egenskaper (dock inte med tydlig energiinriktning) och Mittuniversitet har forskning kring energilagring kopplat till papperselektroder.⁷

Utöver de enskilda lärosäten som tas upp ovan finns, utöver SIO Grafen, flera centrumbildningar med hög relevans för området, varav två bör nämnas särskilt. 2D-Tech (2D material-baserad teknologi för industriella applikationer) bygger vidare på Grafencentrum och är ett nytt centrum för forskning på tvådimensionella material som startas i januari 2020, med stöd från Vinnova och med Chalmers som värd. I centrumet ingår totalt närmare 20 olika parter från den offentliga sektorn och industrin. Några av dessa är 2D Fab, Airbus, Billerud Korsnäs, Graphensic, Saab, Volvo Cars och Talga Graphene. Den totala finansieringen är på över 100 miljoner kronor under fem år, varav 36 miljoner från Vinnova.

I mitten av 2019 fattade Vinnova också beslut om finansiering av ett svenskt kompetenscentrum för batteriutveckling, BASE (Battery Sweden). Centrumet ska bedriva forskning för att skapa nya typer av lätta, billiga, miljövänliga och säkra batterier med ultrahög energilagrings-förmåga.

⁶ Naturligtvis kan många av de artiklar som *inte* kan knytas till något av de energiinriktade sökorden ändå ha hög relevans för energiområdet, särskilt på något längre sikt. Någon granskning av de fullständiga artiklarna har inte gjorts.

⁷ Stockholms universitet har totalt 32 artiklar om grafen, varav två inom specificerade topics, Luleå tekniska universitet 20 (6) och Göteborgs universitet 18 (3). En sökning på "energy" ger totalt 397 träffar, men en översiktlig granskning (av titlar) ger att det absoluta flertalet (>99%) avser mer grundläggande forskning (t ex energinivåer för molekylorbitaler).

Den totala finansieringen är på över 100 miljoner kronor under fem år, varav 34 miljoner från Vinnova. Några av samarbetsparterna är Chalmers, KTH, Rise, ABB, Volvo, Northvolt och Scania. Battery 2030+ är ett långsiktigt europeiskt forskningsinitiativ med samma inriktning, som startade i mars 2019 och ska presentera sin färdplan för kommissionen i februari 2020. Både BASE och Battery 2030+ koordineras av Kristina Edström vid Uppsala Universitet.

Tabell 2.1 Översikt över publicerade artiklar om grafen (totalt mer än 1300), respektive kopplat till olika energitillämpningar med deltagande från svenska lärosäten. I tabellen ingår lärosäten med totalt minst 50 publicerade artiklar med grafen i titeln. Baserad på sökningar i Web of Science, Core database. "Graphene" som title, övriga som topic. Varje artikel tillräknas alla lärosäten med minst en medverkande författare – samma artikel kan alltså räknas till flera lärosäten. En artikel kan dessutom ingå i flera kategorier (kolumner).

Lärosäte ¹⁾	"graphene"	+ "batter*"	+ "supercap*" OR "super cap*"	+ "fuel cell*"	+ "energy storage"	+ "solar cell*"	+ "coating*" + "corrosion*" ²⁾	+ "heat transfer"	+ "lubric*" ²⁾
Chalmers	350	8	6	1	5	6		1	
LiU	285		3	1	3	1		1	
KTH	218	7	10	1	7	4		3	1 (0)
UU	202	15	4	1	5	3			1 (1)
LU	133			2		2	1 (0)	4	
UmU	50	3	6	4	1	2	3 (1)		

1) LiU = Linköpings universitet; KTH = Kungliga tekniska högskolan; UU = Uppsala universitet; LU = Lunds universitet; UmU = Umeå universitet

2) I kategorierna coating/porous materials/gas separation/lubric* förekommer artiklar som egentligen inte är energirelaterade. Siffran inom parentes anger antalet som bedöms vara energirelaterade (baserat på abstract).

Centralt för all grafenforskning i Europa är naturligtvis det EU-finansierade Graphene Flagship, vilket koordineras av Chalmers och där ett flertal svenska universitet är parter eller associerade parter.⁸ Inom detta projekt finns framför allt två arbetspaket med tydlig energiinriktning; WP11 Energy Generation som leds av Frankrike med huvudfokus på sol- och bränsleceller samt WP12 Energy Storage som leds av Italien med huvudfokus på batterier (Li-jon, Li-luft, Li-S och Na-jon), superkondensatorer och vätgaslagring. I just dessa två arbetspaket deltar inga svenska parter.

⁸ Svenska parter är Chalmers, Chalmers Industriteknik, Umeå Universitet, Karolinska institutet, ABB, Ericsson och NanOsc. Associerade svenska parter är Linköpings universitet, Lunds universitet, Kungliga tekniska högskolan, Uppsala Universitet, RISE, APR Technologies, Graphensic och SenseAir.

3 Potential – grafen i energitillämpningar

Grafen har potential att användas för att förbättra prestandan i ett betydande antal olika teknologier och tillämpningar inom energiområdet. I tabellen nedan sammanfattas kortfattat de energitillämpningar som främst identifierats inom färdplansarbetet. För en mer detaljerad genomgång, se rapportens Del II.

Tabell 3.1 Översikt över de energitillämpningar som tas upp i färdplanens Kapitel 7. Vätgas tas upp i Kapitel 6. CO₂-avskiljning nämns enbart under gasseparation i Kapitel 6. Årtalen under rubriken Status avser en grov uppskattning av när tekniken bedöms kunna kommersialiseras.

Elfordon – lagring av energi			
Grafens funktion	Teknisk potential	Marknad	Status
Batterier Grafen (och andra 2D-material) som anodmaterial i Li-jon-batterier Grafen som stabilisator i LiS-batterier	Fördubblad energitäthet (räckvidd) och stabilitet (livslängd); minskad användning av begränsade resurser Möjliggöra LiS-batterier, med kapacitet 4-5 ggr dagens batterier (räckvidd, snabbladdning)	Elfordon generellt – elbilar, hybridbilar, mindre fordon Som ovan, men även tunga fordon, eldrivna flygplan	Knappbatterier nära kommersialisering. För fordon 2030. Utveckling i tidigt stadium. Efter 2030
Superkondensatorer Grafen i elektrodmaterial	Ökad energidensitet – vilket gör superkondensatorer (med hög effektdensitet) intressanta	Motorstart tunga fordon. Kombination med batterier. Kompakta lösningar.	Nära marknaden, första produkter på marknaden nu. Genomslag 2025
Bränsleceller Grafen i katalysator vid katod (f.a. för PEM FC samt DM FC)	Minska mängden platina, vilket ger lägre kostnader och potentiellt längre livslängd	Elfordon med bränsleceller - vätgassamhället	Utveckling i tidigt stadium. Efter 2030
Lagring av el och balansering av elnät			
Grafens funktion	Teknisk potential	Marknad	Status

Batterier Som för elfordon	Som för elfordon	Ellagring – ökat behov med mer förnybar el. Relevant för UPS.	Som för elfordon
Superkondensatorer Som för elfordon	Som för elfordon	Balansering av elnät (korta tidsförlopp, hög effekt) – ökat behov med mer förnybar el, smarta nät etc	Som för elfordon
Termisk energilagring			
Grafens funktion	Teknisk potential	Marknad	Status
Värmelager Grafen i värmelagrings-matris - Grafen för gaslagring	Förbättrat utnyttjande av värmelagringsvolymen gm god värmeledning Samma effekt gm hög specifik yta	Termisk lagring av el – ökat behov med mer förnybar el. Lagring av värme.	På pilotstadium. 2025
Energieffektivisering Grafen i ytbeläggning för minskad friktion	Energieffektivisering vid flytt av värmelagrande material	P.s.s.	2025
Förnybar el			
Grafens funktion	Teknisk potential	Marknad	Status
Solceller Grafen i elektroden (samtliga typer) Grafen som hjälpelektrod i solceller gen 2 och 3. (Fokus på typen Perovskite)	Transparens och flexibilitet Lägre produktionskostnad, stabiliserande (längre livs-längd). Inte högre prestanda (direkt).	Pris för konv. solceller sjunkande. Låg drivkraft för utveckling. Inom nischer för hög flexibilitet, svag instrålning etc..	Lite utveckling Första grafen-perovskite demonstrerad utomhus. 2025
Vindkraft Grafen i ytbeläggning för minskad friktion		Vindkraft i utsatta lägen (till havs) och med större	Liknande tillämpningar relativt nära marknad. 2025

Grafen i ytbeläggning för minskad korrosion	Ökad hållbarhet i lager, generatorer etc (prestanda?) Ökad hållbarhet i konstruktion	verk (högre belastning)	
---	---	-------------------------	--

Värmeväxlare

Grafens funktion	Teknisk potential	Marknad	Status
Ytbeläggning Grafen i ytbeläggning för minskad korrosion/fouling Ytbeläggning för multifunktion	Ökad tillgänglighet, livs-längd, minskat underhåll. Högre verkningsgrad över livslängd. P.s.s med ökad effektivitet gm totalt tunnare beläggning	Värmeväxlare är centrala i all energianvändning. Särskilt för krävande förhållanden - nischmarknader.	På pilotstadium. 2025 Lite längre sikt. 2030
Ökad värmeledning Ytbeläggning eller i vätska (för slutna system)	Energieffektivisering gm högre verkningsgrad (värme-konduktivitet) och friktion	P.s.s.	Oklart om utveckling pågår

Transmission/distribution av el

Grafens funktion	Teknisk potential	Marknad	Status
Högspända kabelsystem Grafenoxid i låg halt i isolationsmaterialets mest belastade delar	Ökad kontroll av isolationsmaterialets resistivitet och därmed tillförlitlighet samt minskad risk för katastrofala isolationsfel.	Ökat behov vid högre spänningsnivåer, mer kompakta designar vid ökande andel förnybar el, ändrad konsumtion	På pilotstadium. 2025
Elektriska kontaktsystem Grafen i elektriska kontakter för lägre friktion och kontaktresistans	Ökad tillförlitlighet, minskat underhåll, längre livslängd. Energieffektivisering genom minskad friktion med upp till	Antal in/från-kopplingar ökar dramatiskt i det smarta kraftnätet. Förbättrade kontakter behövs i t ex brytare och	På pilotstadium. 2025

	en faktor 10. Minskad användning av silver.	frånskiljare i alla transmissions- och distributions-system.	
Motorer, generatorer och turbiner			
Grafens funktion	Teknisk potential	Marknad	Status
Lager och roterande maskiner Grafen i smörjmedel för lägre friktion samt i självsmörjande lager-material (polymera kompositer)	Ökad tillförlitlighet, minskat underhåll, längre livslängd. Energieffektivisering genom minskade förluster. Dessutom minskad miljöpåverkan.	Hela energisystemet. T ex lager i vatten-kraftsturbiner, raffinörer, generatorer (vindkraft).	På pilotstadium. 2025 2030
Vätgas			
Grafens funktion	Teknisk potential	Marknad	Status
H₂-produktion Grafen i selektiva membran för gasseparation H ₂ /luft	Effektivare produktion, lägre kostnader	Vätgasanvändning i industri, fordon (bränsleceller) - vätgassamhället	Utveckling i tidigt stadium. Efter 2030.
H₂-lagring Grafen i material (styrka) Grafen i befintliga tankar Absorption av väte till grafenytan (hög specifik ytareal)	Material i tankar etc för lagring vid högt tryck Förbättra stabilitet/säkerhet och lagringskapacitet Möjliggör lagring vid lägre tryck och/eller ökad lagringskapacitet (ca dubbel)	Vätgasanvändning i industri, fordon (bränsleceller) - vätgassamhället	2025-2030 Utveckling på tidigt stadium. Efter 2030
CO ₂ -avskiljning och avskiljning av andra gaser			
Grafens funktion	Teknisk potential	Marknad	Status
Grafen i selektiva membran för gasseparation CO ₂ /luft, CO ₂ /metan etc	Energieffektivisering av separationssteget	CO ₂ -avskiljning och lagring, rening av biogas, rening av metanutsläpp	2030

Den kvantitativa potentialen i energitermer för ovanstående tillämpningar är svår att uppskatta, eftersom effekterna i de flesta fall är indirekta och inte kan bestämmas i t ex procents effektivisering eller antal GWh. Dessutom är kvantitativa data i energitermer i allmänhet svåra att hitta utan att detaljstudera vetenskapliga artiklar, eller saknas helt. Dock finns det en stor potential, som framgår av nedanstående exempel (se även Del II):

- Accelererad marknad för elfordon, vilket bidrar till att underlätta mål för omställning av transportsektorn. Om andelen elbilar skulle öka med t ex 5 % ett givet år, motsvarar detta en minskad användning av 1-2 TWh fossila drivmedel (bensin/diesel).
- Ökad tolerans för förnybar, intermittent, elproduktion och nya konsumtionsmönster (t ex elfordon) i kraftsystemet. IEA har en prognos på 1 TW ökad förnybar kapacitet globalt de närmaste åren.
- Ökad energidensitet i batterier med en faktor 2 till 5 och i superkondensatorer med en faktor 2-3.
- Minskade värmeförluster och underhållskostnader för värmeöverförande ytor, vilka totalt överför minst 140 TWh per år i Sverige.
- Minskade förluster pga friktion i elektriska kontaktsystem, motorer, generatorer och turbiner (för t ex vattenkraft och vindkraft). Forskning har visat på minskade friktionskoefficienter med en faktor 10, i vissa tillämpningar.

För att i möjligaste mån realisera dessa potentialer krävs att fortsatta utvecklingssteg tas genom pilot- och demonstrationsanläggningar.⁹ Ett försök att uppskatta potentialen för pilotanläggningar inom de närmaste fem åren ger ett spann mellan 5 och 25 stycken. Tillämpningsområden som nämns är batterier för elfordon, superkondensatorer i nya tillämpningar, solceller, krafttransmission, värmeväxlare, materialbesparande lösningar, energilagring för värme och el.

4 Vägen fram – mål och prioriteringar

I det här kapitlet beskrivs den egentliga färdplanen för att främja användningen av grafen i energitillämpningar.

⁹ Med pilotanläggning menas en första/tidig, mindre enhet/anläggning för experimentell utveckling i simulerad miljö (större än labbskala). Med demonstrationsanläggning menas en större enhet/anläggning i relevant industriell skala. Båda syftar till att demonstrera produkt, prototyp, produktion eller system.

4.1 Underlag och samverkan

Färdplanens mål, prioriterade områden och förslag till aktiviteter har baserats på analysen av nuläge och potential och tagits fram i samverkan med referensgruppen och genom flera aktiviteter öppna för alla svenska aktörer. Samverkan har berört grafens potential inom olika områden, viktiga aktörer, mål, hinder och insatser och genomförts genom följande aktiviteter:

- Återkommande avstämning och diskussion inom projektets industriella referensgrupp,
- En inledande workshop i april 2019 med fokus på potential för kommersialisering och relevanta aktörer (se Bilaga A),
- En enkät riktad till aktörer inom grafen- och energiområdet som marknadsförts framförallt genom SIO Grafens kanaler, men även genom direkta utskick till relevanta aktörer. Enkäten fokuserade på prioriterade teknologier och tillämpningsområden och fick totalt 22 svar (se Bilaga B),
- En workshop i oktober 2019 med fokus på mål, hinderanalys och förslag till insatser och aktiviteter (se Bilaga C).

De förslag som presenteras här utgör alltså en sammanvägning av resultaten från samtliga dessa aktiviteter och av den litteraturstudie som genomförts.

4.2 Prioriterade områden

Prioriterade områden för målsättningar och insatser relaterat till grafenanvändning inom energiområdet kan delas upp i dels tvärgående områden, dels i prioriterade teknologier och tillämpningsområden. De tvärgående, mer generella, områdena är helt centrala för utvecklingen av energitillämpningar. De viktigaste områdena som identifierats är olika typer av kunskapshöjande insatser, nätverksbyggande och standardisering som främjar tillgången till grafenmaterial av rätt typ och kvalitet. Vikten av dessa områden framgår vidare av förslag till mål och insatser nedan. I detta avsnitt fokuseras dock på prioritering av några av alla de tillämpnings-områden som identifierats med direkt fokus på energi.

De prioriteringar som föreslås nedan bygger till stor del på resultaten från enkät och workshops, men också på den litteraturbaserade potentialanalysen (se Del II), inklusive kunskap om vilka svenska aktörer som finns inom respektive område.

I diskussionen om olika områden är det relevant att skilja på teknologier och energitillämpningar. Den tekniska potentialen inom olika *teknologier* kan bidra till minskade kostnader och ökad effektivitet och därmed skapa förutsättningar för en ny marknad ("technology push"). Ur grafenperspektiv är det naturligtvis också centralt att det är just grafens egenskaper som kan ge en betydande skillnad i prestanda.

Chansen för det är större om flera av grafens olika, unika, egenskaper kan samverka för att uppnå en förbättrad funktion. Utvecklingen på energimarknaden och efterfrågan inom en viss *energitillämpning* kan sedan ge dragkraft ("market pull") till utvecklingen av grafenanvändningen inom området. Särskilt intressant blir det när utveckling av en teknologi har stor potential inom flera energi-tillämpningar med hög relevans för ett hållbart energisystem.

Utifrån dessa principer och underlag framgår några områden som särskilt intressanta att fokusera insatserna mot den närmaste tiden. I beskrivningen nedan har vi utgått från energitillämpningar. Naturligtvis innebär detta också en fokusering på vissa teknologier.

Elfordon – lagring av energi

Eldrivna fordon utgör en mycket central del i att utveckla ett hållbart transports-system, vilket också innebär att den globala marknaden förväntas öka dramatiskt. För lagring av el i fordonen finns det dock stora utmaningar rörande energi- och effektdensitet och långvarig stabilitet samt resurstillgång för tillverkning.

De teknologier som har störst potential inom aktuell tidsperiod bedöms vara *batterier* och *superkondensatorer*, samt en kombination av dessa. Grafen har betydande potential att bidra till förbättrad prestanda inom båda dessa teknologier, framför allt genom att bidra till ökad stabilitet för batterier och därmed möjliggöra framtida batterityper, som LiS, med potentiellt mycket högre energidensitet och till ökad energidensitet för superkondensatorer.

I Sverige ökar fokus på utvecklingen av framtida batterier genom satsning på ett nytt kompetenscentrum i Uppsala (BASE), ökande satsningar inom fordons-industrin och uppbyggnaden av till exempel batteriproduktion i Skellefteå av företaget Northvolt. Dessutom satsar grafentillverkande företag aktivt på denna marknad.

Lagring av el och balansering av elnät

Ökande andel förnybar elproduktion i Sverige och internationellt ökar behovet av energilagring och ställer också högre krav på momentan balansering av elnätet. Kopplat till grafen är det i första hand *superkondensatorer*, men också *batterier*, som kan bidra till att möta marknaden. Även om skala och prestandakrav i flera avseenden skiljer sig åt finns det alltså även tydliga synergier med *eldrift i fordon*, särskilt vad gäller den mer grundläggande teknikutvecklingen. Dessutom finns en tydlig koppling mellan behovet av ellagring och utveckling av mer effektiva *termiska energilager* med hjälp av grafen.

Detta är en mycket viktig och global marknad, som är central för utvecklingen av hållbara energisystem. I Sverige finns betydande forskning inom området, industriella leverantörer inom kraftsystemet, som till exempel ABB, som utvecklar laddinfrastruktur för lätta och tunga fordon och fartyg samt batterilager för elnätet (BESS) och starka aktörer inom energibranschen som Vattenfall och E.ON. Sverige har också redan en viss balanserande roll i det Europeiska energisystemet, vilket till stor del baseras på den HVDC-teknologi som utvecklats i Sverige

Transmission och distribution av el

Utvecklingen mot ökande andel förnybar elproduktion, överföring på högre spänningsnivåer och behov av mer kompakta designar ställer högre krav på tillförlitlighet och effektivitet för transmission och distribution av el. Även andra utvecklingstrender, som smarta elnät, distribuerad produktion ("prosumenter") och ändrade konsumtionsmönster påverkar behovet av högpresterande transmissions-system.

I det här sammanhanget utvecklas framför allt två typer av tekniska lösningar med grafen. Dels användning av grafenoxid för att skapa ett funktionellt isolerande skikt i högspända kabelsystem, dels grafen/metall-kompositer för lägre friktion och kontaktresistans i elektriska kontaktsystem.

Detta är konkreta teknologiska lösningar där forskning och utveckling pågår i Sverige med lovande resultat. Inom det här området har vi också en stark svensk industritradition, med aktörer som Borealis, NKT och ABB.

Värmeväxlare

Värmeväxlare och värmeöverföring över olika typer är av central betydelse för hela energisystemet och används inom anläggningar för energiomvandling, värmedistribution, processindustri etc.

Flera av grafens egenskaper skulle här kunna ge multifunktionalitet vid användning som additiv i skyddande (anti-korrosiv, självrenande, antibakteriell, anti-biofouling) beläggningar med bibehållen eller förbättrad värmeöverföring och med minskad användning av miljöstörande ämnen. Det finns fortfarande många tekniska utmaningar men också en betydande potential. För utveckling av den här typen av ytbeläggningar finns också synergieffekter med flera av de andra energitillämpningar som identifierats. I Sverige finns ett flertal, internationellt aktiva, aktörer som producerar och utvecklar värmeväxlare, till exempel Alfa-laval, Xylem Inc, Ramab, och Swep. Dessutom är användningen av effektiva värmeväxlare central för hela energibranschen och övrig processindustri.

Motorer, generatorer och turbiner

Motorer, generatorer och turbiner är på liknande sätt som värmeväxlare centrala genom hela energisystemet. Två exempel är vattenkraft och vindkraft, vilket gör att området även är av betydelse för *förnybar elproduktion*. En liten effektivisering och minskande underhållskostnader har stor industriell betydelse.

För dessa tillämpningar kan grafen framför allt bidra genom sina goda tribologiska, dvs smörjande, egenskaper. Användning av grafenförbättrade multifunktionella smörjmedel skulle kunna minska friktion i alla typer av lager och därmed förbättra effektivitet, tillförlitlighet och livslängd, genom minskad nötning och slitage. Även här innebär utveckling av teknologin synergier med flera olika energitillämpningar och det finns viktiga aktörer i Sverige (t ex ABB, SKF, Applied Nano Surfaces, Vattenfall).

Områden att bevaka

Den industriella relevansen av grafenanvändning för solceller kan komma att öka med tiden, även om den i första hand förväntas bli aktuell för mer småskalig användning. Utvecklingen behöver därför följas. Detta gäller också vissa energi-tillämpningar och teknologier där underlag och resurser i denna studie bara räckt till en mycket översiktlig bild av potentialen. Ett exempel på detta är användning av grafen i gasseparerande membran för avskiljning av till exempel CO₂.

4.3 Mål

En tydlig slutsats från arbetet med denna färdplan är att målen för grafen-användning inom energiområdet är och måste vara nära sammankopplade med de generella målen för utveckling och etablering av grafen som material. Mer övergripande mål finns framtagna inom SIO Grafens agenda och omfattar målområdena:

- Etablera grafen som styrkeområde
- Stärka samverkan
- Stimulera svensk grafentillgång
- Tillhandahålla strategisk vägledning

Arbetet med denna och andra färdplaner kan också bidra till utveckling av målen på denna generella nivå.¹⁰

¹⁰ Inom SIO Grafen pågår ständigt ett strategiskt arbete, som kan leda till uppdateringar av dessa mål. Det finns dessutom naturligtvis mål inom andra typer av organisationer som påverkar den generella utvecklingen och etableringen av grafen som material.

Det står också klart att det även relaterat till just energiområdet behövs mål på en övergripande nivå, eftersom många av de hinder som identifierats snarare är generella än kopplade till specifika teknologier eller tillämpningar. Å andra sidan är det också viktigt att försöka identifiera konkreta mål på en något mer detaljerad nivå. Även om tidsperspektivet för utveckling av mål och prioriteringar har varit år 2030, har även en del viktiga mål bedömts möjliga att nå redan till 2025. Nedan har därför de mål som föreslås inom Färdplan Energi delats upp på två nivåer och med två tidsperspektiv.

A. Övergripande mål för utveckling av grafen inom energiområdet

Till **2030** finns:

A30:1. Demonstrationer av industriell användning av grafen och påbörjad kommersialisering inom några energiområden

A30:2. Bra standarder för några energitillämpningar med grafen

Till **2025** finns:

A25:1. God kunskap inom energisektorn om grafens möjligheter

A25:2. Ett starkt nätverk mellan aktörer inom grafen- respektive energiområdet – inom forskningen såväl som på industriell nivå

B. Tillämpningsspecifika mål för utveckling av grafen inom energiområdet

Till **2030** finns:

B30:1. Grafen spelar en väsentlig i utvecklingen av energi- och ellagring till ett etablerat svenskt styrkeområde

B30:2. Grafen bidrar signifikativt till ett robust och säkert elnät

B30:3. Tydliga steg har tagits mot att integrera grafen i framtida cirkulära industribranscher, som t ex (nuvarande) massa- och pappersindustrin

Till **2025** finns:

B25:1. Stark och tydlig energirelevans inom grafeninriktad forskning och grafenrelevans inom energiforskning

B25:2. Grafenanvändning demonstrerad i pilotskala i flera industrinära tillämpningar med stor energirelevans, som t ex ytbeläggning av värmeväxlarytor, värmelager eller i elektriska kontaktsystem för eldistributionsnätet

B25:3. Grafenanvändning demonstrerad i minst en pilotanläggning kopplad till småskaliga och hållbart integrerade energisystem

Tanken med de mer tillämpningsspecifika målen är dels att dessa ska bidra till utveckling inom områden som prioriterats utifrån svensk industri, teknologisk potential och energirelevans, men också att de ska bidra till att de sektorsöver-gripande målen uppnås. Ett exempel är målet att demonstrera grafenanvändning inom ett småskaligt, integrerat energisystem, där detta också kan bidra till att stärka nätverket mellan grafen- och energiaktörer och till ökad kunskap om grafens möjligheter inom energisektorn och hos andra typer av aktörer.

4.4 Framgångsfaktorer

Under den andra workshopen inom arbetet med färdplanen diskuterades vilka hinder som fanns för att uppnå önskvärd utveckling och uppsatta mål. Framför allt togs då mer generella hinder som är kopplade till att kunna nå ut på marknaden och industrialisera ny teknik upp. I det här avsnittet har diskussionen sedan omvandlats till att beskriva viktiga framgångsfaktorer. Forskningsrelaterade och teknologiska utmaningar knutna till specifika grafontillämpningar nämns i viss mån i litteratur-studien (se Del II), men tas inte upp i detalj här.

Fokus på tillämpningar och teknologier med störst potential

För att kunna fokusera insatserna rätt är det viktigt att identifiera de områden där användning av grafen ger störst komparativa fördelar gentemot alternativ teknik och/eller material. Ett sätt är att identifiera områden där flera av grafens egenskaper kan samverka för att ge ökad prestanda. Arbetet med den här färdplanen är ett steg i det arbetet. Arbetet behöver dock fortsätta och kan stödjas på olika sätt, till exempel genom ökad kunskap om hur olika tekniklösningar kan jämföras.

Realistiska förväntningar

Grafen som material drabbades, liksom många nya teknologier, tidigt av en hype som sedan mattats av när förväntningarna visat sig svåra att uppfylla. Risken med en sådan utveckling är att man sedan får en efterföljande fas med ”det går aldrig”. Genom kunskap, nätverkande och balanserad kommunikation om realistiska och trovärdiga potentialer och tidsplaner kan förtroendet gradvis stärkas och realistiska förväntningar skapas.

Hög beredskap hos industrin att delta i utveckling och prova ny teknik

Det finns stora inneboende risker i att vara tidigt ute vid utveckling och användning av ny teknik. Genom samverkan, kunskapshöjande insatser och innovativa finansieringslösningar kan tröskeln för industri sänkas. Det är också viktigt att öka kapaciteten för att hantera IP-relaterade frågor vid marknadsnära diskussioner.

Tillräcklig tid för utveckling

Det tar tid från nya forskningsrön till att dessa når en kommersiell marknad. Det tar också tid att bygga den kompetens som krävs för att hantera nya teknologier och material. Det går dock att förbättra planering och samordning, så att olika steg delvis kan tas parallellt. Till exempel att tidigt planera för relevanta utbildningar och satsa på insatser för att driva standardiseringsarbetet framåt. Standardiserings-arbetet behöver särskilt prioriteras, eftersom det också finns en särskild risk om dåliga standarder hinner utvecklas, vilket kan blockera teknikutvecklingen.

Aktiv involvering av aktörer inom energibranschen

För att få en faktisk industriell utveckling behöver rätt aktörer få ökad kunskap om grafens möjligheter och vara direkt involverade i utvecklingsarbete, testsiter och demonstrationssatsningar. Det finns många olika typer av aktörer som behöver involveras, till exempel reglerande myndigheter, standardiseringsorgan och konsumentorganisationer. Särskilt viktigt är dock att nå ut till tillverkande industri inom energibranschen, inklusive underleverantörer av komponenter.

Teknologiska och industriella flaskhalsar identifieras och satsas på

Parallellt med dessa mer organisatoriska och institutionella faktorer krävs naturligtvis fortsatt satsning på forskning och utveckling för att möta de teknologiska utmaningarna. Det omfattar både mer grundläggande tekniska och kemisk/fysikaliska flaskhalsar och trösklar för att skala upp och industrialisera produktionsteknik och -processer.

4.5 Insatser och aktiviteter

Aktiviteterna är satta i prioritets- och tidsordning, så att de viktigaste satsningarna står först och av de med liknande prioritet står de som bör genomföras tidigast under femårsperioden först.

För att uppnå de målen för utveckling av grafen inom energiområdet, ovan, föreslås ett antal konkreta insatser och aktiviteter under de närmaste fem åren, vilka sammanställts i Tabell 4.1, nedan. Naturligtvis finns det starka synergier mellan de olika aktiviteterna, till exempel bidrar ju kunskapsspridande aktiviteter i hög grad till utveckling av nätverk och vice versa.

Tabell 4.1 Förslag till insatser och aktiviteter inom Färdplan Energi.

Kategori	Aktivitet	Ansvarig/deltagare	Tidpunkt	Mål
Kunskaps-spridning	Spridning och presentation av färdplanen i lämpliga forum	SIO Grafen, Energimyndigheten, Vinnova	2020	A25:1
	Utarbeta informationsmaterial kring olika specifika energiområden, inklusive "lessons learned" med såväl goda som dåliga exempel	SIO Grafen	2020-2022	A25:1
	Ta fram en levande karta över vem (vilka organisationer) som gör vad inom området	SIO Grafen	2020-2025	A25:1, A25:2
Nätverks-byggande	Delta aktivt i BASE (Battery Sweden)	Uppsala Universitet och nuvarande centrumparter, organisationer som deltar i SIO Grafen,	Pågå	A25:2, B30:1
	Genomför workshoppar/seminarier inom olika teknikområden med fokus på samarbeten	SIO Grafen - identifiera och bjud in samtliga delar av (resp) värdekedja	2021-2022	A25:2

	Forma fastare nätverksgrupperingar (tvärvetenskapliga och tvärsektoriella aktivitetsgrupper) baserat på dessa workshops/seminarier	SIO Grafen => grafen – energi – fordons-industri – tillverkare – massa och papper	2022-2025	A25:2, B30:2, B30:3
Fortsatt kunskapsuppbyggnad	Genomför fördjupade potentialstudier för prioriterade tillämpningar (primärt) – för att än tydligare definiera inom vilka områden grafen kan göra stor skillnad.	SIO Grafen; Energimyndigheten, Vinnova, 2D-TECH	2021-2022	A25:1; A25:2
	Tydliggör systeminriktad metodik för jämförelse av tekniklösningar ur energisynpunkt	SIO Grafen, Energimyndigheten	2021-2022	A25:1, A30:1
Standardisering	Delta aktivt i samarbete kring standardisering av energitillämpningar, så att potentiell grafenanvändning inkluderas	SIS, industrirepresentanter; (SIO Grafen förmedlande roll)	2020-2025	A30:2
Utveckling av forsknings-inriktning	Utforma tydliga krav på bedömning av energirelevans/ energikonsekvenser i ansökningar/som del av SIO Grafens grafenprojekt	SIO Grafen	2020-2021	A25:1, B25:1
	Utveckla pilotprojekt inom energiområdet med grafeninslag och ansök om finansiering	Industrier och forskare, utifrån centrubildningar (t ex 2D-TECH,	2022-2025	A30:1, B25:2, B25:3

BASE) och
uppbyggda nätverk

Tillämpad forskning för
att utveckla
energirelaterade
tillämpningar och
teknologier,

Samlande forsknings-
aktörer som 2D-
TECH, BASE m.fl.

2020-
2030

A30:1, B25:1
B30:1, B30:2,
B30:3

Undersök möjligheter
att genomföra
gemensamma
utlysningar mellan olika
SIP:ar

SIO Grafen
tillsammans med
LIGHTer, DRIVE
Sweden,
infraSweden2030,
Produktion2030 etc

2020-
2025

A25:1, B25:1

Del II – Nyckelteknologier och energitillämpningar

I denna del beskrivs potentialen för användning av grafen inom ett antal nyckel-teknologier för energiområdet och i relevanta energitillämpningar. Detaljerings-nivån för beskrivningen varierar ganska mycket mellan områden. Detta beror framför allt på tillgänglig information. Sammanställningen syftar till att sammanställa befintlig kunskap på en övergripande nivå och fakta baseras till övervägande del på Graphene Flagships Roadmap¹¹. Det finns i allmänhet betydande osäkerhet kopplat till de området och syftet med vissa uppgifter är framför allt att ge en uppfattning om storleksordningar.

Det har inte funnits någon ambition att ge en detaljerad teknisk beskrivning på specialistnivå eller att i detalj identifiera vilka forskningsinsatser som krävs för att möta de tekniska utmaningarna. För energitillämpningarna ligger istället fokus på att identifiera den industriella relevansen, marknadspotential och naturligtvis grafens potentiella roll.

¹¹ Graphene and other 2D materials – Technology and Innovation Roadmap V3, Fraunhofer ISI, Graphene Flagship, Mars 2018 som ännu inte är offentliggjord (2019). Resultaten från denna färdplan har emellertid presenterats vid ett flertal konferenser, till exempel under Graphene Week 2019 i Helsingfors.

5 Några nyckelteknologier för grafen i energitillämpningar

Grafen har potential att användas i olika energitillämpningar, varav ett flertal beskrivs i nästa kapitel. I detta kapitel beskrivs några nyckelteknologier som skulle kunna spela en särskild roll för flera av dessa energitillämpningar. Kapitlet syftar till att översiktligt beskriva vilka teknologier som är aktuella, grafens potentiella roll, förbättringspotential, tekniska utmaningar samt utvecklingsläget för teknologin.

5.1 Grafen som material

Eftersom forskning och utvecklingen av grafen kommit betydligt längre än för andra 2D-material så fokuserar beskrivningen i följande stycke på grafen.

5.1.1 Grafens egenskaper

Grafen är ett kolbaserat material, som utgörs av ett atomlager tunt skikt vilket gör det i stort sett tvådimensionellt (2D). Ofta räknas skikt med färre än 10 atomlager som 2D-material. Karaktäristiskt för 2D-material är deras särskilda egenskaper, vilka dessutom kan kombineras, så att egenskaper som annars ses som oförenliga i vanliga, tredimensionella material kan fås samtidigt.

De särskilda egenskaperna hos grafen, vilka alltså generellt sett kombineras i samma materialskikt, är:

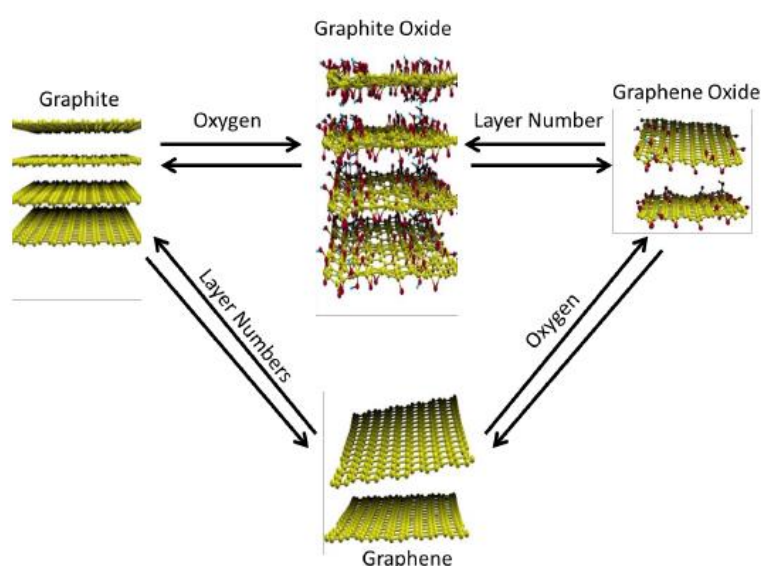
- Starkt, vilket gör att materialskikt kan göras tunna och med låg vikt, utan att kompromissa med hållbarhet.
- Hög termisk och elektrisk ledningsförmåga.
- Böjbart och därmed möjligt att använda i tillämpningar där flexibilitet är viktigt.
- Hög transparens, vilket möjliggör tillämpningar där transparenta skikt är användbara.
- Ogenomträngligt för gaser, vilket möjliggör användning som membran.
- Stor yta i förhållande till vikt.
- Goda tribologiska egenskaper (friktion, nötning och smörjning).

Det är alltså dessa egenskaper som har potential att utnyttjas i de olika energitillämpningar som beskrivs i Kapitel 6, oavsett om det sker genom utnyttjande av en av de teknologier som beskrivs nedan eller på annat sätt.

I de flesta av dessa tillämpningar används grafen snarare som en tillsats för att skapa olika typer av funktionella material. Med funktionella material menas material eller kombinationer av material som designas på atomär- eller nanoskala för att uppnå en speciell funktion, till exempel specifika mekaniska, elektroniska, fotoniska, kemiska eller biologiska funktioner.

5.1.2 Tillverkning av grafen

Kommersiell grafen produceras vanligen i form av grafenfilm eller som grafenflagor. Flagorna består normalt av några få lager grafen, med varierande antal defekter och varierande storlek. I flera tillämpningar kan även grafenoxid användas för att uppnå önskvärda effekter, speciellt när det kemiskt reduceras så kallad reducerad grafenoxid (rGO). Grafenflagor är generellt enklare att tillverka och billigare och har mindre defekter än grafenfilm, men det är små (i storleks-ordningen μm) medan grafenfilmer kan göras betydligt större och ofta som enskilda grafenlager. Grafen kan produceras genom ett flertal olika tekniker, vilket naturligtvis påverkar kvalitet och kostnad så att dyrare produktionsprocesser oftast ger mindre volym, men bättre kvalitet och tvärtom.



Figur 5.1 Olika grafentyper på marknaden. Källa: IDTechEx¹²

Produktion av grafenfilm sker antingen med hjälp av deponering genom kemisk förångning (chemical vapour deposition, CVD) eller epitaxiella metoder.

För produktion av grafenflagor finns det fler möjliga metoder. Särskilt kan dessa delas upp i direkt exfoliering (en metod för att separera olika lager av ett material) och i metoder som först producerar grafenoxidflagor, för att sedan reducera dessa till grafenflagor. Den senare metoderna riskerar att resultera i mer defekter och orenheter i produkten. Även om dessa kan försämra grafenmaterialets inneboende egenskaper kan de även underlätta kopplingen till exempelvis polymermatrisen i ett kompositmaterial.

Den totala kapaciteten för grafenproduktionen i världen uppgår till i storleks-ordningen 6000-7000 ton per år, medan den faktiska produktionen är mycket lägre.

¹² Graphene Markets, Technologies and Opportunities 2014-2024, Dr Khasha Ghaffarzadeh och Dr Harry Zervos, IDTechEx

Till övervägande del sker dagens produktion i Kina, som år 2017 stod för 66% av den globala produktionen (drygt 750 ton) och 35% av användningen. Grafenpriset visar stora variationer mellan olika kvaliteter, men har sjunkit betydligt under senare år. Ett pris runt 50€ per kilo förväntas göra materialet attraktivt för många marknader och förväntas enligt branschen kunna bli verkligt runt 2025.¹³ I Sverige finns grafitfyndigheter, som kan bli råvara för grafenproduktion. Förutom en grafitgruva (Woxna) har dock fyndigheterna ännu inte börjat producera i större skala. Även det australienska företaget Talga Resources Ltd, har kopplingar till grafitgruvor i Sverige, vilka de planerar att använda för bland annat grafen-tillverkning.

Det finns flera grafenleverantörer i Sverige. Graphensic tillverkar epitaxiell grafen från kiselkarbid. 2D fab har påbörjat utbyggnad av sin produktion, med målet att nå en kapacitet på 10 ton/år under 2020. Det finns också ett företag (Graphmatech) som tillverkar en grafenhybrid. Andra företag som arbetar i liten skala är Brightday Graphene och Grafren.

En stor utmaning för de flesta grafitillämpningar är alltså att producera grafen i tillräckliga mängder och med jämn och (tillräckligt) hög kvalitet, för respektive användningsområde. Den stora variationen i olika grafensortiment gör också att det kan vara svårt att välja rätt material för rätt tillämpning. Det pågår därför parallella insatser för att både öka produktionskapacitet i Europa och Sverige och för att stärka processer för standardisering och kvalitetssäkring av materialet. En standard har tagits fram för nomenklaturen kring grafen och relaterade 2D-material (ISO/TS 80004-13), vilken förväntas bidra till jämnare kvalitet och en mer mogen marknad.

Det finns naturligtvis många andra hinder och utmaningar i att kunna utnyttja grafens principiella egenskaper i faktiskt tillgängliga tillämpningar – både tekniska och marknadsmässiga. Dessa tas upp under respektive avsnitt nedan och i Kapitel 6.

5.2 Batterier

Den batterityp som dominerar marknaden idag, bland annat för eldrivna fordon, är Li-jon-batterier (LIB). Idag har dessa en katod av $\text{Li}(\text{Ni}, \text{Mn}, \text{CO})\text{O}_2$. Anoden består normalt av grafit. En vidareutveckling av anodmaterialet kan öka batteriernas kapacitet och öka möjligheten för snabbaddning. Grafen tillsammans med kisel (Si-graphene) är ett sådant potentiellt anodmaterial som i princip skulle kunna fördubbla laddningskapaciteten (från under 400 mAh/g till 800 mAh/g).

¹³ Graphene Markets, Technologies and Opportunities 2014-2024, Dr Khasha Ghaffarzadeh och Dr Harry Zervos, IDTechEx

En övergång från grafit till rent kisel som anod kan teoretiskt öka laddnings-kapaciteten hos LIB mycket mer, men då ökar anodpartiklarnas volymförändring vid laddning och urladdning kraftigt, vilket leder till instabilitet. Genom en kombination av kisel och kol kan problemet minskas, men för att uppnå stabilitet behövs också ett skyddande skikt mellan kiselaterialet och elektrolyten som samtidigt ger tillräcklig elektronisk och jonisk konduktivitet för Li-Si reaktionen. Grafen i en Si-grafen-anod, med en jämn tjocklek på 4-10 grafenlager, skulle kunna bidra med samtliga de funktioner som efterfrågas. Si/C eller Si/G-kompositer med upp till 20 % kisel kan ge en specifik kapacitet på mer än 1000 mWh/g. Ett exempel på en utmaning är att den stora ytan på grafen påverkar Li-åtgången vid uppbyggnaden av ett fast elektrolytskikt i batteriet, vilket ställer särskilda krav på förbehandling av anoden.

Dagens LIB innehåller ämnen som utgör begränsade resurser, som t ex kobolt, men även litium och grafit. Stora delar av de globala resurserna finns dessutom i länder som Kongo och Kina, vilket kan begränsa tillgången i t ex Europa ytterligare. Utöver efterfrågan på batterier med hög kapacitet och livslängd, ökar detta också intresset av att utveckla helt nya batterityper.

Ett alternativ för nästa generations batterier är därför LiS-batterier. Dessa har potentiellt en kapacitet som är 4–5 gånger högre än dagens batterier, men stora problem med stabilitet och livslängd. Även för dessa batterier pågår utvecklings-arbete med målet att kunna använda grafen för att förbättra batteriernas prestanda. Med tillsats av grafen skulle batterierna kunna stabiliseras, få lång livslängd och en ytterligare fördubblad kapacitet samt förbättrade förutsättningar för snabbaddning. För att uppnå dessa teoretiska fördelar krävs dock grafenflagor i större mängder av jämn kvalitet (<10 lager). För närvarande pågår tester av enskilda celler.

För energirelaterade tillämpningar i större skala utvecklas batterier främst för användning i elfordon, där hög energidensitet och effektkapacitet är centralt. Batterier kan dock även vara aktuella för lagring av el i stationära tillämpningar, där energidensitet inte är av lika stor vikt.

Olika marknadsrelaterade studier av potentialen för grafenanvändning i batterier är något motstridiga. Till exempel bedömer man att mindre grafenförbättrade Li-jon-batterier kunna finnas på marknaden från och med ca 2025 och i större skala (för t ex elfordon) ca 2030. Enligt en annan marknadsbedömning skulle grafen-användning i batterier kunna svara för mer än 30% av den totala marknaden för grafen år 2025. Utvecklingen av LiS-batterier, och motsvarande, befinner sig dock ännu i ett tidigt stadium och teknikerna som sådana kommer troligtvis inte att vara kommersiellt tillgängliga inom de närmsta 10 åren.

5.3 Superkondensatorer

Superkondensatorer är även det en teknologi för lagring av energi. Jämfört med batterier så lämpar sig superkondensatorer för applikationer med höga krav på effektuttag och lägre krav på energimängd. De består av elektroder belagda med kol som skiljs åt av en elektrolyslösning, där energi lagras i form av elektriska laddningar.

Jämfört med batterier har superkondensatorer följande egenskaper:

- Högre effektdensitet och därmed även kortare laddningstid.
- Lägre energidensitet.
- Fungerar i ett större temperaturspann (typiskt -40 till 85 °C jämfört med 0 till 45 °C för batterier), vilket bland annat medför mindre brandrisk.
- Längre livslängd.
- Snabbare själv-urladdning.
- Bättre energieffektivitet (mindre förluster jämfört med Lithium-jon-batterier).

Så kallade hybrid-superkondensatorer kombinerar tekniken för superkondensator och batteri, vilket resulterar i en kombination av de två lagringstypernas egenskaper.

Tekniken för superkondensatorer anses inte vara lika mogen som dagens batteri-teknik. Däremot har användningen av *grafen* i superkondensatorer kommit längre än för batterier. Den största nackdelen och utmaningen för superkondensatorer är den låga energidensiteten. Hållbarheten samt driftspänningen begränsas främst av elektrolytens stabilitet, vilket gör elektrolyten extra intressant för utveckling. Aktivt kol, som används som elektrod i dagens moderna superkondensatorer, medför låg energidensitet. Grafen kan potentiellt spela en viktig roll i att lösa problemet, och skulle därmed kunna öppna upp för nya användningsområden för superkondensatorer. Redan idag existerar flera olika typer av grafenmaterial som kan användas. Den stora tillgängliga ytan är en fördel, liksom materialens mekaniska och termiska stabilitet samt goda ledningsförmåga. Utveckling pågår kring att öka packningsdensiteten och därmed även energidensiteten hos superkondensatorer. För att den här tillämpningen ska bli aktuell i större skala och ekonomiskt konkurrenskraftigt behöver kostnaden för yt-elektrod-materialet vara uppskattningsvis 20 €/kg eller lägre. Användning av grafen i superkondensatorer befinner sig idag på pilotstadiet för flertalet tillämpningar och bedöms kunna få en ökad kommersiell marknad före 2025. Redan nu finns vissa grafen-förbättrade superkondensatorer som kommersiella produkter.¹⁴

¹⁴ Skeleton Technologies hemsida, www.skeletontech.com (hämtat 2019-12-10).

5.4 Bränsleceller

Bränsleceller är en tredje teknologi som möjliggör lagring av energi för tillämpningar i till exempel elfordon. Jämfört med batterier och superkondensatorer lagras energin i form av bränsle. Bränslecellerna omvandlar sedan energin i bränslet till el, för användning i till exempel elmotorer. Stora fördelar med bränsleceller jämfört med batterier är möjligheten till snabb påfyllning av bränsle och högre energidensitet. Dessutom har de hög elektrisk verkningsgrad (upp till 60 %), vilket kan ge högre total effektivitet än förbränningsmotorer.

Det finns många olika typer av bränsleceller, men grafen verkar i dagsläget framför allt ha potential att användas i komponenter till bränslecellstypen Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEM FC) samt för bränslecellstypen Direct Methanol Fuel Cells (DMFC).

Bränslecellstypen PEM FC används i fordon och stationära lagringsenheter. Marknaden för PEM FC var 360 miljoner dollar år 2014, och förväntades nå 1,9 miljarder dollar år 2020. PEM FC anses vara mest lämpad för mindre applikationer med en effekt upp till 50 kW, vilket till exempel motsvarar användning i mindre byggnader.

För att öka effektdensiteten och uthålligheten så är reduktionsreaktionen vid katoden en viktig faktor, men också en stor utmaning för utvecklingen av bränsleceller. Idag används platina eller en platinallegering som katalysator, vilket tyvärr leder till förkortad livslängd hos bränslecellerna. Vidare är platina-katalysatorer dyra, vilket anses vara en bidragande orsak till bränslecellers höga kostnader. Alternativ till platinakatalysatorer utgörs bland annat av grafenbaserade material.

Grafen och grafenbesläktade material har, tack vare sin mycket höga specifika yta och elektriska ledningsförmåga, potential att användas både som elektro-katalysator direkt och som stödmaterial för katalysatorn i bränsleceller på olika sätt. Användningen av grafen kan därmed bidra till att minska användandet av platina på flera olika sätt. Grafenoxiders funktionella grupper kan användas för att stödja katalytiska reaktioner, vilket kan förbättra bränslecellernas elektro-katalysator. Mängden platina som används i elektrokatalysatorn (materialförlusten) kan också minskas genom att använda grafen för att skydda elektrolyttagret mot att oxideras (t ex inkapsling av platina-nano-partiklar i ett lager kväve-grafenkomposit).

Vidare är elektrokatalysatorer med grafen mer motståndskraftiga mot korrosion. Grafen kan även öka systemets verkningsgrad och systemets stabilitet över tid. Tillverkningsprocessen är enklare än för platina-baserade elektrokatalysatorer, vilket kan minska tillverkningskostnaderna. Utvecklingen av grafen för bränsle-cells-applikationer befinner sig i ett tidigt stadium och är troligen inte aktuell förrän efter 2030.

Det verkar heller inte finnas tillräckligt mycket kunskap än om hur bränsleceller med olika typer av grafenlösningar skulle prestera jämfört med konkurrerande alternativ.

5.5 Solceller

Solceller för elproduktion delas in i generation 1, 2 och 3. Generellt har generation 1 högst verkningsgrad, medan generation 2 är billigare, mer flexibla och lättare. Solceller av generation 3 befinner sig ännu i forskningsstadiet, där man söker billigare alternativ och alternativa material. Solceller av den här varianten kan vara transparenta. Begreppet generation 3 inkluderar flera olika typer av solceller, däribland solceller av så kallad Perovskite-typ.

Grafen är ett av flera olika material som potentiellt kunna ersätta befintliga material i elektroden hos solceller av alla tre generationer. De material som idag används i elektroder är ofta sköra, baserade på material som riskerar att bli dyra i framtiden och/eller miljöfarliga. Utöver transparens och god ledningsförmåga har grafen bland annat fördelen att det skulle kunna användas vid flexibla tillämpningar samt vid högre temperaturer.

Grafen har även potential att användas som hjälpelektrod i solceller tillhörande generation 2 och 3, och därmed möjliggöra en platinafri hjälpelektrod. Vidare verkar användning av grafen potentiellt kunna bidra till att minska produktions-kostnaderna för solceller tillhörande både generation 2 och 3. Grafen-material för den här typen av tillämpningar är dessutom relativt lätta att processa.

I vissa typer av solceller skulle grafen kunna användas som fotosensibiliserare, dvs ljus-absorberare. Grafen har även använts som ett buffertlager i Perovskite-solceller för att öka deras stabilitet, vilken är kritisk för utveckling och kommersialisering, och öka solcellernas verkningsgrad samt skydda mot fukt och slitage. Den här typen av Perovskite-solceller har uppnått en verkningsgrad på över 18% i labbskala, vilket är högre än de flesta andra solceller av generation 3.

Ytterligare utveckling av Perovskite-solceller andra solceller av generation 3 (och i viss utsträckning även generation 2) väntas potentiellt kunna leda till att en högre verkningsgrad, lägre kostnader samt en rad nya användningsområden på grund av deras flexibilitet, transparens, anpassningsbarhet och lätta vikt. Ett exempel är användning vid alternativa ljusförhållanden, som inomhus eller i väggar och fönster.

Tekniken befinner sig dock fortfarande i ett tidigt utvecklingsstadium och de studier som hittills genomförts med grafenbaserade elektroder för solceller av generation 2 och 3 har inte resulterat i samma prestanda som alternativa material, utan verkningsgraderna har legat 3-10% lägre. Endast när det gäller robusthet har bättre prestanda kunnat ses.

Idag kopplas solceller samman till solpaneler med hjälp av silverfärger. Grafen har potentialen att ersätta silver i solpaneler om tryckfärger med lika eller bättre elektriska egenskaper som silverfärger kan tillverkas. Silverfärger har mycket bra elektriska egenskaper, men är dyra och silver kan ha en negativ miljöpåverkan.

5.6 Vätgas – produktion och lagring

Vätgas kan användas för lagring av energi både stationärt och i till exempel fordon. Det finns flera olika potentiella användningsområden för grafen både vad gäller lagring och produktion av vätgas.

Dagens vanligast förekommande standard för lagring av vätgas är vid ett tryck på 700 bar, vilket medför betydande förluster vid kompression, säkerhetsrisker samt krav på komponenter att klara så högt tryck. Styrkan och tåligheten hos grafen gör att materialet generellt lämpar sig bra för användning vid lagring av gaser vid högt tryck. Den största fördelen för grafen vid en sådan tillämpning är dock dess stora specifika yt-area. Så kallad grafen-baserad lagring av väte sker genom adsorption av väte till grafens ytor. Denna typ av lagring möjliggör lagring vid ett lägre tryck och/ eller en ökad lagringskapacitet. Lägre tryck kan medföra säkrare lagring och därmed större acceptans av allmänheten. Lagring vid lägre tryck försvåras dock av den redan befintliga standarden, vilken anger tryckkrav för vätgaslagring.

För lagring av väte i ett grafenbaserat system är det möjligt att nå ungefär 6-7% W för det rena materialet och 3-4% W för hela lagringssystem, d.v.s. att den mängd väte som går att lagra i systemet väger 3-4% av systemets egen vikt. Absorptionen av väte till en grafenytta kan vara antingen i form av van der Waals krafter, vilket tillåter snabb påfyllning av väte till lagringssystemet, eller atombindning, som är ett relativt stabilt och viktmässigt något lättare alternativ (upp till 8,3 % W förväntas kunna nås).

Det finns flera andra liknande alternativa tekniker för framtida lagring av väte, som även de baserar sig på porösa material. Dessa inkluderar metallhydridbaserade system, grafit eller kolnanorör, metall-organiska matriser och polymerbaserade lagringssystem.

Grafen skulle också kunna användas i redan befintliga trycktankar för att förbättra systemets stabilitet och lagringskapacitet (energi per volymenhet) samt minska dess explosivitet. En mindre tankvolym är en fördel vid till exempel användning i fordon då det möjliggör minskad bränsleförbrukning genom minskat luftmotstånd.

Grafen skulle även potentiellt kunna användas vid vätgasproduktion, då en annan egenskap hos grafen-tytor är att materialet kan släppa igenom protoner (d.v.s. väte) medan det inte är möjligt för andra gaser och vätskor att tränga igenom.

Grafen kan därför användas för att skapa selektiva membran, som i sin tur kan användas för att skilja väte från luft vid vätgasproduktion. Det bör dock nämnas att den här tekniken befinner sig i ett väldigt tidigt stadium.

Generellt befinner sig utvecklingen av grafen för tillämpningar inom vätgasproduktion och lagring i ett tidigt stadie och det är ännu oklart hur teknikerna står sig jämfört med konkurrerande och alternativa tekniker.

5.7 Gasseparation

Grafen kan ha en funktion vid utveckling av membran för gas-separation. Tillämpningar som diskuteras är separation av väte från luft, koldioxidavskiljning för lagring, separation av metan från koldioxid i biogas och möjligen även metaninsamling. För polymerbaserade membran behöver en avvägning göras mellan genomträngbarhet och selektivitet. Forskare på Graphene Flagship har lyckats möjliggöra en snabbare och mer effektiv gas-separering genom användning av grafen-oxid.¹⁵

Membran för separering av koldioxid kan göras miljövänliga och har fördelen att de inte avger något avfall eller liknande. Med hjälp av grafen så kan separation av koldioxid efter förbränning förbättras väsentligt jämfört med andra liknande metoder.¹⁶ Den här typen av teknik kan komma att bli aktuell för användning vid CCS (Carbon Capture and Storage). För att detta ska hända behöver kostnaden vara låg jämfört med alternativa gas-separeringstekniker. Om så är fallet bedöms marknaden för grafen-baserade membran kunna bli stor i framtiden.

6 Potential för energitillämpningar

Nedan beskrivs potentialen för grafenanvändning utifrån *tillämpningsområde*, snarare än teknologi. Inom vissa tillämpningsområden finns potential för användning av flera olika teknologier. Områdena beskrivs generellt utifrån följande perspektiv:

- Tillämpning och marknad samt hur detta skulle kunna påverkas av grafen, vilken/vilka teknologier som är aktuella och hur tillämpningen relaterar till förutsättningar i Sverige.
- Teknisk potential och status – sammanfattning av teknisk förbättringspotential, utvecklingsstatus samt tekniska utmaningar.

¹⁵ Graphene makes its mark on gas separation, 2018-06

¹⁶Next-gen membranes for carbon capture (2019, July 26) hämtad 18 oktober 2019, www.phys.org/news.

- **Energirelevans**

Bedömning av marknadspotential och energirelevans görs som övergripande uppskattningar med syftet att ge en uppfattning om storleksordningar. För att potentialen ska kunna realiseras kommer det att krävas att ett flertal tekniska och marknadsmässiga utmaningar hanteras.

Samtliga de energitillämpningar som nämns i sammanfattningen i Kapitel 3 tas inte upp separat här. Särskilt gäller detta användning av vätgas inom industrin och CO₂-avskiljning (se dock avsnitt 5.6 och 5.7).

6.1 Elfordon

6.1.1 Marknad och grafens potentiella roll

Marknaden för elfordon förväntas öka kraftigt, på grund av deras potential att effektivisera transporter och reducera användningen av fossila drivmedel. Eldrift kan bidra till effektivisering av de flesta fordon, men är i närtid särskilt intressant för fordon som går kortare sträckor (till exempel lokalbussar, truckar) och lätta fordon (f.a. bilar, men även transportslag som mopedbilar och elsparkcyklar). Särskilt gäller detta batterifordon. År 2016 registrerades 93 miljoner nya fordon i världen, varav 90 miljoner var lätta fordon (bilar). Globalt fanns mer än 2 miljoner elbilar 2016, vilket motsvarar mindre än 0.2% av alla lätta fordon (LDV).¹⁷

För elfordon fokuserar vi här på användning av grafen för utveckling av olika teknologier för lagring av energi.¹⁸ Användning av grafen i batterier, superkondensatorer och bränsleceller skulle kunna bidra till förlängd räckvidd (genom högre energidensitet), ökad livslängd/stabilitet för batterier (eller motsvarande), lägre lagringskostnad och minskat beroende av knappa eller särskilt dyra resurser, som till exempel platina. Detta är generellt centrala utvecklings-områden för att sänka tröskeln för övergång till eldrivna fordon. På detta sätt kan konkurrenssituationen för elfordon jämfört med fordon baserade på förbränningsmotorer stärkas, så att efterfrågan ökar både inom ett visst segment som till exempel elbilar och genom breddning till fler fordonssegment, som till exempel tyngre fordon eller till och med flyg.

Lagring av energi i batterier är den teknologi som dominerar marknaden för elfordon nu och som också förväntas fortsätta göra det. Kina dominerar produktionen idag och förväntas svara för över 60 % av den globala produktionen år 2025.

¹⁷ EnergyEfficiency 2017, 2017, International Energy Agency

¹⁸ Grafen skulle också kunna vara relevant för elfordon, genom andra tillämpningar, som till exempel användning av lättviktsmaterial, i smörjning av lager etc, men dessa är mer generella och inte specifika för elfordonsmarknaden och tas inte upp här.

Samtidigt finns det en stark kostnadspress med höga mål för kostnadssänkningar för t ex batterier. Marknaden för fordonsbatterier motsvarade under 2017 nära 100 GWh och ökar för närvarande med ca 20 % per år.

Denna ökningstakt förväntas fortsätta åtminstone fram till år 2025, vilket skulle innebära mer än 400 GWh år 2025, vilket om man utgår från dagens kostnadsnivå för battericeller skulle motsvara en marknad på i storleksordningen 100 miljarder €. Sammantaget bedöms grafen i batteritillämpningar för elfordon, trots den mycket stora marknadspotentialen, som en mindre trolig förstamarknad för teknologin. Den mest troliga användningen inom denna marknad är som komplettering i elektroder med grafen som ett ledande additiv.

Superkondensatorer används idag främst för att ge hög effekt under kort tid, vilket inom elfordonsrelaterade marknader omfattar till exempel motorstart av ubåtar, diesellastbilar och järnvägslok. Andra potentiella användningsområden är bland annat lastkranar, självgående fordon för materialhantering (t ex gaffeltruckar) och laddning av fordon. Befintlig infrastruktur har ofta begränsningar i effektuttag och superkondensatorer skulle kunna ge laddstolpar med bättre effekt för snabbladdning. I många sammanhang ska inte superkondensatorer ses som ett alternativ till batterier utan snarare som ett komplement. Ett exempel är återvinning av bromsenergi, som kan stå för upp till 25% av bränsle-/el-förbrukning hos en bil. Superkondensatorer kan lagra den energin, som är relativt liten men med hög effekt eftersom förlusterna blir små. Detta är svårare för LIB. En tredje kategori är också hybrid-superkondensatorer (batteri-superkondensator), som kan kombinera egenskaperna hos de två teknologierna (se även nedan). Marknadsuppskattningar för denna kategori saknas dock.

Marknaden för superkondensatorer har uppskattats till fem procent av batterimarknaden. Den framtida *totala* marknaden för superkondensatorer med grafen i elektroden har uppskattats till mellan 500 och 1000 miljoner dollar. Trots att superkondensatorer i dagsläget har för hög kostnad och för låg energidensitet för att generellt kunna konkurrera med batterier, förväntas transport vara det område med störst framtida marknad.

Slutligen kan energi för elfordon istället lagras kemiskt för omvandling i bränsleceller. Utvecklingen och marknaden för bränslecellsfordon är starkt kopplad till utvecklingen av vätgas som energibärare, vilket utöver själva fordonen innebär behov av infrastrukturutveckling kopplat till både distribution och produktion av vätgas.¹⁹ För elfordon diskuteras framförallt användning av bränsleceller av typen PEM. Marknaden för dessa *totalt* var 360 miljoner dollar år 2014, och förväntades nå 1,9 miljarder dollar år 2020.

¹⁹ Användning av grafen för utveckling av lagring av vätgas, t ex i fordon, diskuteras i Avsnitt 4.x. om vätgastillämpningar.

Ökande andel elfordon är i högsta grad aktuellt för det svenska transportsystemet, på motsvarande sätt som i Europa och globalt. Utvecklingen av fordon och energilagringssystem sker dock för den internationella marknaden och är mer kopplat till svensk industristruktur, t ex utveckling av laddinfrastruktur för elfordon och fartyg, än till efterfrågan på slutprodukten i Sverige. Inom värdekedjan för batterier finns det starka svenska industriella aktörer såväl inom batteriproduktion (NorthVolt), utveckling av batteriteknik, elfordon (Volvo, NEVS). Av dessa aktörer är det dock bara en mindre del som i dagsläget är involverade i SIO Grafen. De främsta industriella aktörerna i Europa, relaterat till grafenanvändning i superkondensatorer, verkar inte finnas i Sverige.

Volvo har haft ett större bränslecellsprogram och företaget Powercell AB utvecklar bränsleceller av typen PEM. På den svenska marknaden är i dagsläget vätgas och elbilar med bränsleceller mindre aktuellt än olika typer av laddningsbara fordon.

6.1.2 Teknisk potential och status

Den tekniska potentialen för hur användning av grafen i batterier, super-kondensatorer och bränsleceller kan bidra till förbättrad prestanda sammanfattas i tabellen nedan. Där så är möjligt ges kvantitativa värden, men i många fall finns bara uppgifter om vilken typ av förbättring som kan uppnås.

Teknologi	Grafenanvändning	Förbättringspotential
Litium-jon-batterier (LIB)	Si-grafen anod (ersättning av grafitanod)	Energidensitet * 2 (från ca 400 mAh/g till 800 mAh/g) Ökad möjlighet för snabbladdning
Litium-jon-batterier (LIB)	GO-Si-nanopartikel-elektroder	Energidensitet *3 (1100 mAh/g)
LiS (svavel)	Stabiliserande skikt	Stabilisering, vilket kan möjliggöra tekniken (som har teoretisk energidensitet *10)
Superkondensatorer	Grafen i elektroden	Ökad energidensitet, med en faktor 2-3 Förbättrad stabilitet Mindre förluster (högre ledningsförmåga)
Bränsleceller (PEM)	Grafen i elektroden	Sänkt kostnad

Den tekniska statusen för användning av grafen för energilagring i elfordon varierar naturligtvis mellan teknologier och komponenter. Användning i superkondensatorer ligger närmast marknaden. Där finns redan vissa kommersiellt tillgängliga tillämpningar.

För batterier handlar det i närtid främst om vidareutveckling av LIB. Utveckling av helt nya batterityper förväntas inte närma sig kommersialisering förrän möjligtvis framåt 2030.

Det finns stora tekniska utmaningar för att realisera dessa grafentillämpningar:

- Det krävs tillräckliga mängder grafen av tillräcklig och tillförlitlig kvalitet, vilket är en gigantisk utmaning. Denna förstärks också genom tidigare dåliga erfarenheter inom fordonsindustrin.
- Det krävs ytterligare betydande utvecklingsarbete för att finna rätt komposition (Si/grafen/C) hos elektrodmaterialiet och uppnå stabilitet.

Parallellt pågår också även annan utveckling för ökad energidensitet, livslängd och förbättrad stabilitet i batterier och superkondensatorer, vilka på sätt och vis konkurrerar med grafen.

6.1.3 Energirelevans

Övergång från förbränningsmotorer till eldrift höjer fordonens verkningsgrad, i användarledet, betydligt. Idag består 10% av nybilsförsäljningen av laddningsbara bilar (batteribilar och laddhybrider).²⁰ I utredningen *Fossilfrihet på väg* gjordes bedömningen att genom olika typer av insatser skulle andelen kunna öka till 20-40% år 2030. En sådan ökning bedömdes leda till en minskning av den fossila drivmedelsanvändningen med 4-8% genom ökad fordonseffektivitet och med 3-14% genom ersättning med el. Sammantaget skulle detta motsvara i storleks-ordningen 5-15 TWh mindre fossil drivmedelsanvändning inom transportsektorn, vilket i sin tur motsvarar 1,3-3,9 Mton CO₂-reduktion, förutsatt att den el som används för drift av elfordon är förnybar.²¹ I dessa siffror är inte energi-användningen för produktion av batterier medräknad.

Konsekvensen av en sådan övergång till elfordon är i stort densamma oavsett batteriteknik eller grafenanvändning i batterierna. En viss direkt påverkan av genombrott för grafenanvändning skulle kunna fås genom en effektivare produktionsprocess och en miljöeffekt av att använda mindre miljöpåverkande material i produktionen. De indirekta effekterna förväntas vara större, men är än svårare att kvantifiera. Med indirekta effekter menar vi här framförallt påverkan på marknaden genom att produkten (elfordon) blir mer attraktiv, vilket kan innebära en snabbare övergång till elfordon och ökad storlek på marknaden som helhet. Ett exempel skulle vara om det är just tillsats av grafen som möjliggör en kommersialisering av svavelbaserade batterier, med en 4 gånger så hög energidensitet som dagens LIB.

²⁰ Referens BilSweden

²¹ Fossilfrihet på väg, Statens offentliga utredningar, SOU 2013:84

6.2 Lagring av el och balansering av elnät

6.2.1 Marknad, energirelevans och grafens potentiella roll

Med en ökande andel förnybar elproduktion, som till större andel är intermittent och mindre reglerbar än dagens kraftslag, ökar behovet av nya typer av stabiliserande och balanserande enheter. Detta kan gälla både ellagring för längre och kortare tidsperioder, till exempel användning av UPS (uninterruptible power supply) eller frekvensreglerande kraft som hjälper till att balansera elnätet momentant. Förnybar kapacitet prognostiseras att öka med 1 TW globalt under perioden 2018-2023, där solceller står för mer än hälften.²² I länder som Sverige, med stor andel reglerbar vattenkraft som kan användas för nätbalansering är behovet av lagring för systemet som helhet visserligen mindre än för länder som t ex Tyskland, men förväntas ändå öka. Dessutom ökar behovet av mer lokal korttidslagring, för att minska belastningen i lokala och regionala nät och behovet av investeringar för att förstärka nätkapaciteten. Till exempel är nätkapaciteten i Mälardalen och Malmöregionen begränsad, vilket påverkar möjligheten att tillföra energiintensiva företag, utbyggnad av laddstationer för elfordon etc.

Det pågår många parallella utvecklingsspår för att på olika sätt få ett mer flexibelt energisystem, som kan hantera en ökande andel förnybar elproduktion. Exempel är produktion av så kallade elektrobränslen (produktion av bränslen från el och CO₂) och vätgas, pumpkraft och utnyttjande av s.k. smarta nät för ökad flexibilitet på användarsidan. Batterier och super-kondensatorer är bara ett av dessa spår och kan förväntas svara för en mindre andel av det totala behovet av flexibilitet. Batterier och superkondensatorer med grafen bedöms på kortare sikt i sin tur svara för en liten andel av den potentialen.

På motsvarande sätt som för elfordon, så innebär inte utveckling av lagrings-möjligheter en direkt energieffektivisering, utan är snarare en möjliggörare av annan teknik och systemförändringar som ger ett mer hållbart energisystem – i det här fallet en mer radikal utbyggnad av förnybar elproduktion. Bättre teknik för lagring av el kan också innebära att andra investeringar i utbyggnad av elnät och reservkraft undviks.

De teknologier där grafen kan vara relevant för utvecklingen är även för denna tillämpning framförallt batterier och superkondensatorer.²³ Batterier (UPS) är i första hand aktuella för energilagring under längre tidsperioder och används framförallt för samhällskritiska funktioner, som sjukhus, och datacenter.

²² *Renewables 2018*, International Energy Agency, 2018

²³ För längre tidsperioder kan det också finnas andra lagringsteknologier där grafen kan ha en potentiell roll, till exempel termiska energilager samt kemiskt i form av vätgaslager (se även 6.3 och 5.6).

Superkondensatorer lämpar sig bäst för lagring vid tillämpningar som kräver ett högt effektuttag under en kort tid, som till exempel spänningsstabiliserande enheter i elnät samt eventuellt vissa typer av frekvensreglering. Förbättringar som kan uppnås med hjälp av grafen inkluderar bland annat ökad energidensitet, vilket möjliggör lagring av större energimängder och därmed längre uthållighet.

Även om behovet för det svenska energisystemet är lägre än på kontinenten, finns det ett betydande svenskt intresse för detta område, eftersom vi har starka industriaktörer inom området, vilka även verkar internationellt. Exempel är ABB, som är verksamt inom hela intervallet från individuella komponenter till kontroll av hela kraftsystemet, från transmission till distributionsnivå. Sveriges elnät, liksom balansmarknaden, är dessutom sammanlänkat med resten av Europa.

6.2.2 Teknisk potential och status

Den tekniska potentialen för utveckling av batterier och superkondensatorer med hjälp av grafen beskrivs under 6.1.2, ovan, och är i princip densamma för denna tillämpning. Dock finns det för stationär lagring av el med batterier inte samma volym- och viktkrav för batterierna, vilket gör att energidensiteten inte är lika avgörande. Det gör också att drivkraften för grafenanvändning i batterierna inte är lika stark.

För både batterier och superkondensatorer utgör tillgången till grafen av rätt kvalitet och, framförallt, i tillräckliga mängder en stor utmaning på samma sätt som för fordonstillämpningar.

6.3 Termiska energilager

6.3.1 Marknad, energirelevans och grafens potentiella roll

Marknaden för termiska energilager är dels kopplad till den ökande produktionen av förnybar el (se avsnitt 6.2), vilken även kan lagras termiskt för senare användning i form av värme eller för termisk produktion av el, dels till olika typer av tillämpningar där även värmeanvändningen behöver balanseras över tid. Exempel på det senare kan vara tillgång till industriell spillvärme, där det finns ett närliggande värmebehov, men där tidsprofilen för dessa inte stämmer överens. Som beskrivits ovan bedöms den totala efterfrågan på lagringsmetoder för energi som mycket stor och det kommer att behövas ett flertal olika teknologier som kan möta efterfrågan inom olika segment.

Termisk energilagring skulle då i första hand vara aktuellt för lagring från dag till natt eller upp till veckovis, och i tillämpningar inom skalan från kW upp till några MW, men andra segment skulle också kunna vara relevanta.

Termiska energilager bygger på att värme lagras i ett material som kan ta upp värmeenergi med hög energidensitet och sedan avge värmets effektivt, utan att tappa för mycket i temperatur. För att få en struktur och skapa tillräcklig yta för att absorbera värmets, används oftast någon form av keramisk matris för att hålla det värmelagrande materialet.

Grafen kan i det här sammanhanget ha potential att bidra till utvecklingen på flera sätt:

- Genom att grafen är inert vid höga temperaturer och har god värmeöverföringsförmåga kan det användas i den matris som ska hålla det material som lagrar energin. Genom grafens goda värmeledning kan hela volymen utnyttjas bättre.
- Värmelagringen sker i vissa fall som lagring av het gas, där grafen med hög specifik yta lämpar sig väl för gaslagring och kan öka specifik lagringskapacitet i relation till volym.
- Termisk energilagring kan också innebära flytt av stora mängder material mellan ”kalla” och ”varma” sidan. Här kan grafens potential att minska friktionen innebära en ren energieffektivisering genom minskade förluster.

Liksom för lagring av el i batterier och superkondensatorer dominerar inte den svenska marknaden. Däremot finns svenska industriaktörer som är aktiva på den europeiska marknaden, där potentialen är stor. SaltXTechnology, baserat i Hägersten, invigde år 2019 en pilotanläggning i MW-skalan i Berlin, där överskottsel lagras för att sedan överföras som värme till Berlins fjärrvärmenät. Denna anläggning använder inte grafen, men tekniken bygger på nanobelagt salt. Däremot pågår ett utvecklingsarbete tillsammans med Ahlström-Munksjö, som syftar till att använda grafen för att förbättra värmeöverföringen i lagringsmaterialet. En testanläggning har körts och ytterligare en är planerad.

6.3.2 Teknisk potential och status

För en bedömning av den tekniska statusen för grafenanvändning i termiska energilager finns det begränsat med underlag, eftersom den tillämpningen inte ingår i internationella genomgångar av grafen inom energiområdet. Däremot har det genomförts två relaterade projekt inom SIO Grafen, som lett till utveckling av metoder för produktion av en grafenmatris, baserat på en grafensuspension med grafenflagor, vilket lett till avsevärda förbättringar av värmeledningsförmågan i matris och värmelagringsmaterial.²⁴

Kvaliteten på grafenmaterialet bedöms inte vara en lika stor utmaning för denna tillämpning som för flera av de övriga tillämpningarna. Enligt bedömningar av svensk industri inom området skulle grafenförbättrade system för termisk lagring kunna finnas på marknaden redan tidigt under 2020-talet.

²⁴ Se SIO Grafens projektinformation på www.siografen.se/projekt/

6.4 Förnybar elproduktion

6.4.1 Marknad och grafens potentiella roll

Inom tillämpningsområdet förnybar elproduktion diskuteras grafen framför allt som ett material för utveckling av solceller, men i viss mån även för vindkraft. Förnybar kapacitet prognostiseras att öka med 1 TW globalt under perioden 2018-2023, där solar PV står för mer än hälften.²⁵ Installerad solcellskapacitet ökade med 97 GW globalt 2017. Vindkraften har byggts ut kraftigt under en längre tid, men utbyggnaden förväntas fortsätta. Framför allt sker utbyggnaden nu i form av allt större (och högre) verk och kraftverk till havs, vilket i båda fallen innebär större påfrestningar på konstruktionen.

För solceller skulle grafen kunna bidra genom flera av dess materialegenskaper som transparens, styrka, hög ledningsförmåga samt att materialet tål höga temperaturer. Grafen förväntas inte primärt bidra till högre verkningsgrad, utan framförallt till minskade produktionskostnader genom ersättning av dyra material, som platina, och mer effektiva produktionsmetoder samt till utvecklingen av mer flexibla solceller, vilket kan bidra till en breddas marknad (se även avsnitt 5.5).

Inom vindkraftsområdet kan grafen användas till smörjning av lager, och då bidra till mindre friktion och minskat slitage, samt till ytbeläggningar för minskad korrosion. Genom välfungerande beläggningar kan behovet av underhåll minskas. Beläggningar kan även användas för att skydda de delar av vindturbinen som är högt mekaniskt belastade och för att minska slitage av bladen.

En utmaning för utveckling av vindkraftsmarknaden är att det redan finns beläggingsmaterial för applicering på stor area vid marina applikationer till bra pris och funktion. Grafen skulle dock trots detta kunna komma till användning vid särskilt påfrestande förhållanden.

Inom Sverige finns få industriella solcellsaktörer. Däremot pågår framstående forskning inom det som ofta kallas solceller av generation 3, framför allt vid Uppsala universitet. Sverige har heller inga direkta producenter av vindkraftverk. Utbyggnaden av solceller och vindkraft har hittills gått långsammare i Sverige än i grannländer som Danmark och Tyskland, men har under senare år accelererat.

²⁵ *Renewables 2018*, International Energy Agency, 2018

6.4.2 Teknisk potential och status

Den tekniska potentialen för hur användning av grafen i solceller och vindkraftverk kan bidra till förbättrad prestanda sammanfattas i tabellen nedan. Där så är möjligt ges kvantitativa värden, men i många fall finns bara uppgifter om vilken typ av förbättring som kan uppnås.

Teknologi	Grafenanvändning	Förbättringspotential
Dagens kiselceller (generation 1)	Grafen som transparent ledande elektrod (TCE)	Sänkt produktionskostnad, hållbarare material
Nya solcellstyper av generation 2 (t ex CIGS)	Grafen som transparent ledande elektrod (TCE)	Sänkt produktionskostnad, hållbarare material
Nya solcellstyper av generation 3 (t ex av Perovskite-typ)	Grafen som transparent ledande elektrod (TCE) Grafen för flexibilitet och robusthet i material	Nya marknader för svagt ljus och flexibla material
Vindkraftverk	Smörjning av lager samt ytbeläggning mot t ex korrosion	Förlängd livslängd och lägre kostnader för underhåll

Den tekniska statusen för användning av grafen för solceller och vindkraft varierar naturligtvis mellan teknologier och komponenter. Användning av ytbeläggning för reduktion av korrosion förväntas närma sig marknaden runt 2025 och off-shore-tillämpningar för t ex vindkraftverk några år senare.

Perovskite-solceller och andra tillämpningar med grafen bedöms kunna kommersialiseras som tidigast framåt 2025 och då först inom flexibla och småskaliga tillämpningar samt för speciella tillämpningar, som t ex svagt ljus. Däremot är grafen i kommersiella solceller för elproduktion mer tveksamt och i så fall först aktuellt i ett längre perspektiv. Denna tillämpning bedöms därför vara av mindre relevans inom denna färdplans tidsram.

6.5 Värmeväxlare och annan värmeöverföring

6.5.1 Marknad, energirelevans och grafens potentiella roll

Värmeväxlare och värmeöverföring över olika typer av ytor är etablerad teknologi med breda användningsområden och en mogen marknad inom anläggningar för energiomvandling, värmedistribution, processindustri etc. I stort sett all värmeanvändning innebär att något värmeöverförande media passerar genom någon form av värmeväxlare, ofta i flera led.

Den globala marknaden för värmeväxlare har uppskattats till 160 miljarder kronor år 2018 och förväntas öka till 290 miljarder år 2026.²⁶

De möjliga tillämpningar som diskuteras för att använda grafen för att förbättra värmeväxlarens prestanda är av relativt generell natur och skulle kunna medföra förbättringar oavsett typ av värmeväxlare, även om förbättringspotentialen sannolikt varierar mellan olika värmeväxlartyper. Liknande lösningar kan därför vara aktuella även för andra typer av utrustning där värmeöverföring är central, som till exempel absorptionsvärme-pumpar. På värmeväxlarnas ytor används idag olika typer av ytbeläggningar för att minska korrosion och s k fouling av ytorna (nedsmutsning och påväxt av olika slag), vilket med tiden sänker värmeväxlarens prestanda och ökar kostnaderna för underhåll och rengöring. Beläggningen i sig hämmar dock även värmeöverföringen, varför man vill använda beläggningar som är så tunna som möjligt, med fortsatt funktion.

Grafen skulle även kunna användas som additiv i skyddande (anti-korrosiv, självrenande, antibakteriell, anti-biofouling) beläggning under speciellt krävande förhållanden. Genom dess höga värmekonduktivitet finns dessutom potential att behålla eller förbättra effektiviteten vid beläggning. I speciella tillämpningar, där hög korrosionstålighet och lätt vikt krävs, skulle grafen även kunna användas som tillsats i själva värmeväxlarmaterialet. I tillämpningar med slutna system, som till exempel kylvatten, skulle grafen möjligen också kunna tillsättas i vätskan för att öka värmeöverföring och minska friktionsförluster.

Marknaden för grafenförbättrade värmeväxlare inom den tidsperiod som den här färdplanen täcker, kan förväntas vara en mycket liten del av den totala värmeväxlarmarknaden. I och med att dessa ytbeläggningar, åtminstone inledningsvis, kommer att vara dyrare än befintliga lösningar bedöms de i första hand vara aktuella för särskilda nisch tillämpningar med särskilt svåra förhållanden avseende korrosion och fouling.

Det finns också en utveckling inom Europeiskt regelverk som kan främja utvecklingen av nya ytbehandlingsmaterial, eftersom vissa av de material som idag används kan förbjudas eller deras användning begränsas. Redan nu har regelverket påverkat användning av krom och andra komponenter, som till exempel zink och nickel, diskuteras också.

Betydelsen i energitermer av förbättrad värmeöverföring och minskad fouling i värmeväxlarsystem är generellt stor. I Sverige används totalt ca 140 TWh värme per år, varav 80 TWh i bostäder och lokaler och 60 TWh för processvärme. Om, för enkelhets skull, all värme antas passera en värmeväxlare skulle alltså varje procents minskning i förluster motsvara ca 1,4 TWh.

²⁶ Heat Exchangers Market Report, tillgänglig via http://www.strategyr.com/Heat_Exchangers_Market_Report.asp

Tillämpningen har också en stor potential att minska kostnaderna för underhåll samt förlänga livslängden för värmeväxlare. Den totala vinsten skulle vara mycket större genom att underhållsstopp också påverkar produktionen.

I Sverige finns ett flertal, internationellt aktiva, aktörer som producerar och utvecklar värmeväxlare, till exempel Alfa-laval, Xylem Inc, Ramab, och Swep. Dessutom är användningen av effektiva värmeväxlare central för hela energibranschen och övrig processindustri.

6.5.2 Teknisk potential och status

Den tekniska potentialen för hur användning av grafen i värmeväxlare kan bidra till förbättrad prestanda sammanfattas i tabellen nedan. För detta tillämpningsområde finns få uppgifter om kvantitativa värden, eftersom det är mindre behandlat i litteraturen än en del av de övriga områdena. Det ingår till exempel inte i genom-gången av energitillämpningar inom Graphene Flagships Roadmap.

Teknologi	Grafenanvändning	Förbättringspotential
Värmeväxlare oavsett typ	Ytbeläggning för reduktion av korrosion	Ökad livslängd med bibehållen effektivitet
	Ytbeläggning för anti-fouling	Minskat underhållsbehov
Värmeväxlare för slutna system	Grafen i vätskan	Minskad friktion, ökad effektivitet (värmeöverföring)

Det har visats att grafenoxid (GO) effektivt kan reducera genomsläppligheten för syre i värmefåliga plastbeläggningar, bilda en barriär för vattenånga eller fungera som en ytbeläggning för att hindra korrosion, om den appliceras direkt på en metallyta. Resultat för elektrokemiskt genererad grafen, som till och med är lättare att processa än GO, har visat en minskning av syregenomgången på upp till 90%. Resultaten varierar dock mellan olika studier, vilket delvis kan kopplas till varierande grafenkvalitet.

Ett exempel på där grafen testats hittills är som ytbeläggning för att minska korrosion vid tillämpningar med t ex havsvatten. Ovanpå den beläggningen har sedan en annan beläggning använts för att minska fouling. I dessa tester har beläggningen inte förbättrat effektiviteten i en ny värmeväxlare, men gett ökad effektivitet över värmeväxlarens livslängd. Nästa steg som diskuteras i det här sammanhanget är att kunna kombinera dessa två effekter i ett, grafenförbättrat, ytbeläggningsmaterial som skulle kunna minska förlusterna ytterligare.²⁷

²⁷ Muntlig information, Olga Santos Alfalaval

Det finns också en generell potential för användning av grafen eller andra 2D-material för avancerade ytbeläggningar, där ett lager skulle kunna bidra med flera olika funktioner och därmed reducera antalet olika ytbeläggningsmaterial. Det är även dessa möjligheter som kan vara relevanta för värmeväxlare.

Användning av ytbeläggning för reduktion av korrosion förväntas närma sig marknaden runt 2025. En utmaning med att realisera denna tillämpning är att applicera beläggningar på en korrugerad platta som är i rostfritt stål.

6.6 Krafttransmission och distribution

6.6.1 Marknad och grafens potentiella roll

Kraftsystemet utgör en central del av energisystemet, som måste fungera med hög tillförlitlighet för att elförsörjningen ska fungera. Systemet består av allt från stamnätet (400 kV och 220 kV) och storskalig elproduktion som vattenkraft och kärnkraft till mer lokal distribution, småskalig produktion och förbrukning. Det involverar en stor mängd olika aktörer, reglerande myndigheter, till nätägare, producenter och enskilda elkonsumenter. Som exempel var i Europa den totala inkomsten från isolerade elektriska ledare för spänningsnivåer över 1kV 4,5 miljarder € år 2014. I Sverige låg den totala elanvändningen 2017 på 126 TWh. De totala förlusterna i elnätet ligger på ca 7,5% (ca 10 TWh).²⁸ För varje tiondels procent minskade förluster sparas alltså ca 150 GWh.

Globalt ökar behovet av effektiv transmission över stora geografiska avstånd, vilket innebär ökande spänningsnivåer och ökad risk för störningar i systemen. Påfrestningarna samt behovet av förstärkning och utveckling av dessa system ökar också genom ökande andel förnybar elproduktion, mer distribuerad elproduktion och de möjligheter och utmaningar som är kopplade till utvecklingen av smarta nät och förändringar i konsumtionsmönstren, till exempel som en följd av utvecklingen av elfordon.²⁹

Grafens roll för krafttransmission och distribution är dels kopplad till isolering av högspända kabelsystem, dels till utveckling av elektriska kontaktsystem. Genom tillsats av låga halter av grafen i isoleringsmaterialet vid de mest belastade delarna kan tillförlitligheten i överföringen öka. Behovet för sådana lösningar ökar vid överföring på högre spänningsnivåer och även när man vill använda mer kompakta designar i till exempel urbana miljöer.

²⁸ Huvuddelen sker i de regionala och lokala elnäten, medan förlusterna i stamnätet ligger på ca 2% (2,5-3 TWh), Elåret & Verksamheten 2015, Svensk Energi

²⁹ Systemutvecklingsplan 2018-2017, Svenska Kraftnät

Användning av grafen i elektriska kontaktsystem, som till exempel brytare och frånskiljare, skulle kunna bidra till minskade förluster genom lägre friktion och kontaktresistans, men framför allt genom ökad tillförlitlighet, minskade underhållskostnader och längre livslängd genom ökad nötnings-beständighet och bättre smörjning av kontaktsystemen.

Energirelevansen för isolering av högspänningskablar och elektriska kontaktsystem består alltså främst i att teknologin kan bidra till ett mer stabilt och kostnads-effektivt kraftsystem, vilket är nödvändigt för att uppnå den utveckling vi strävar efter med mer förnybar kraft, lokal produktion och smarta elnät. Den är svår att kvantifiera i energitermer. Dessutom finns dock även en viss potential för minskade förluster i elektriska kontaktsystem och därmed energieffektivisering.

Ett väl fungerande och effektivt system för krafttransmission och distribution är naturligtvis centralt för Sverige (som överallt annars), eftersom vi också har högt satta mål för omställning till förnybart, smarta nät och fossilfritt transportsystem. Det finns också en stark svensk industri inom området med företag som Borealis, KTT och ABB. Viktiga aktörer inom forskning och utveckling finns både inom den akademiska arenan (Chalmers, KTH, Uppsala Universitet) och forskningsinstitut (RISE m.fl.).

6.6.2 Teknisk potential och status

Den tekniska funktionen för att använda grafen till isolering av högspända kabelsystem innebär att grafenoxidmaterial kan användas som ett halvledande funktionellt material i skarvar och kabelavslut där belastningen är som högst. Med hjälp av inblandning av GO i låg koncentration kan ett isolerskikt skapas vars elektriska motstånd minskar olinjärt med ökande spänning, vilket gör det möjligt att sprida ut det elektriska fältet på ett optimalt sätt i isolationssystemet och därigenom minska risken för katastrofala isolationsfel.

Grafenförbättrade material (tex 3% GO i silikongummi) har fördelen att de är starkare och mer flexibla samt kan tåla högre temperaturer jämfört med dagens material. Nackdelar är dåliga mekaniska egenskaper, hög vikt och en tendens att överhettas vid starka elektriska fält. Dock finns frågor kring den långsiktiga stabiliteten hos det grafenförbättrade materialen som behöver utredas ytterligare.

Grafenanvändning i elektriska kontaktsystem är framför allt kopplat till utnyttjande av grafens smörjande egenskaper. Genom att deponera ett tunt fast grafenskikt på ytan kan friktionen mellan metallytorna sänkas betydligt. Genom grafens goda ledningsförmåga skulle sådana skikt kunna användas med fortsatt låg kontakt-resistans. Kompositer bestående av metaller (Cu, Ag) och grafen kan även tillverkas genom sintring eller elektrodexponering.

Den tekniska potentialen för hur användning av grafen i system för transmission och distribution av el kan bidra till förbättrad prestanda sammanfattas i tabellen nedan. Där så är möjligt ges kvantitativa värden, men i många fall finns bara uppgifter om vilken typ av förbättring som kan uppnås.

Teknologi	Grafenanvändning	Förbättringspotential
Isolering av högspända kabelsystem	Spänningsberoende isolering i högbelastade nätkomponenter, med hjälp av GO i låga koncentrationer	Lägre dielektrisk förlust och ökad åldringsstabilitet ³⁰
Ytbehandling av elektriska kontaktsystem	Fast smörjmedel för till exempel glidande elektriska kontakter Hög nötningsbeständighet	Reduktion av friktionskoefficient med en faktor 10 på silver/silver-kontaktytor, med lång livslängd och oförändrad kontaktresistans ³¹
	Grafen/metallkompositer smörjmedel för elektriska kontakter	Reducerad friktion, möjliggör fettfria kontaktsystem för bättre tillförlitlighet och minskat underhåll
	Alternativ till silverbeläggning	Lägre temperaturlastning; upp till 50% lägre kostnad; betydligt lägre miljöpåverkan ³²

6.7 Motorer, generatorer och turbiner

På liknande sätt som grafit, har grafen goda tribologiska, dvs smörjande, egenskaper. Generellt kan grafen i smörjmedel medföra fördelar som minskat slitage, ändrad ledningsförmåga, ökat skydd mot korrosion samt termisk ledningsförmåga vilket kan underlätta kylning. Olja med inblandning av grafenflagor eller GO visar något bättre friktionskoefficient än motsvarande med grafit och minskad nötning av materialen. Användandet av grafen som additiv till vätskor befinner sig långt fram i utvecklingen, och förväntas snart finnas på marknaden.

³⁰ Wang et al (2012a) *Graphene Oxide Filled Nanocomposite with Novel Electrical and Dielectric Properties*, Advanced Materials; Wang et al (2012b), *Effect of High Aspect Ratio Filler on Dielectric Properties of Polymer Composites: A Study on Barium Titanate Fibers and Graphene Platelets*, IEEE; Li et al (2016), *Structure and Electrical Properties of Silicone Rubber Filled with Thermally Reduced Graphene Oxide*, IEEE

³¹ Mao et al (2015), *Graphene as a lubricant on Eg for electrical contact applications*, Journal of Material Science

³² Guarino et al (2017), *Life cycle assessment of a new graphene-based electrodeposition process on copper components*, Journal of Cleaner Production.

Det finns mindre hinder för utvecklingen av den här typen av vätskor än för utvecklingen av olika typer av fasta beläggningar, eftersom vätskorna kan användas som de är medan de fasta beläggningarna ofta måste appliceras i flytande form och sedan torka. Den här typen av vätska skulle kunna användas som smörjmedel för att ytterligare minska friktionen i till exempel motorer, generatorer och turbiner. Användning av grafen som additiv i smörjmedel är mer sannolik i slutna system (t ex i industriella processer), eftersom man vill undvika att använda grafen (och andra nano-additiv) vid tillämpningar där omgivningen kommer i kontakt med medlet. Projekt i Sverige har även visat på att grafenbaserad beläggning får en radikalt sänkt start- och rörelsefriktion jämfört med standardutförande, men att det är stora variationer i egenskaper samt pris beroende på materialkälla och tillverkningsmetod.³³

Även forskning på nya grafenförbättrade material (potentiellt smörjningsfria) visar på mycket stor potential att reducera friktionskoefficienterna (se även Avsnitt 6.6), vilket skulle kunna vara högst relevant för detta tillämpningsområde. Utveckling av självsmörjande lagermaterial är också fokus för det ett projekt som fokuserar på lager i vattenkraft. I detta fall ligger fokus på nötningsbeständiga kompositer som kan användas som lager tillsammans med vatten och andra typer av miljövänliga smörjmedel. En viktig drivkraft för denna utveckling är också att undvika miljöpåverkan till följd av smörjmedelsläckage. Preliminära resultat visar på förbättrad prestanda i termer av friktion och nötning. Resultaten kommer fortsätta verifieras genom större labbskala och i en rotordynamisk testrigg.³⁴

Additiv för användning i smörjmedel förväntas nå 16,2 miljarder dollar år 2019. Europeiska företag har en stor del av marknaden (omkring 4,7 miljarder dollar 2014). Utvecklingen drivs bland annat av ett ökat behov av bättre och multi-funktionellt smörjmedel för till exempel ökad energieffektivisering. Smörjmedel med grafen som additiv förväntas finnas på marknaden innan 2025.

³³ Se SIO Grafens projekt; Nanokolbeläggning (ingår inte i Bilaga A)

³⁴ Se även projekt inom SIO Grafen; Grafenbaserade självsmörjande nötningsbeständiga kompositer för lager i vattenkraft

Bilagor

A. SIO Grafens forskningsprojekt inom styrkeområde energi

Inom SIO Grafen fanns 2019 totalt 19 projekt kategoriserade som relaterade till Styrkeområde Energi, varav 15 är avslutade. Flertalet av dessa är dock kategoriserade som relevanta för flera olika styrkeområden och energi-relevansen varierar. Med den avgränsning av ”energi-branschen” som beskrivits ovan är det framför allt följande projekt som direkt berörs av den här färdplanen:

- **10 ton**, 2D fab, Valmet, Ahlstrom-Munksjö Paper, SaltX Technology
Produktion av grafen i större skala för olika tillämpningar och värdekedjor, med test i energilagringssystem som särskild fallstudie.
- **Anisotropa egenskaper hos grafen nanokompositer för högspänningsisolering (avslutat)**, Chalmers, ABB
Förlängd livslängd för isolering av likspänd högspänningstransmission, vars användning ökar med ökande andel förnybar elproduktion. Grafen bidrar med anisotropa egenskaper, låg vikt samt hög mekanisk hållfasthet.
- **Grafenkomposit som elektrod i superkondensatorer (avslutat)**, Bright Day Prototypes, RISE Acreo
Genom att använda elektroder baserade på grafen kan superkondensatorer få mycket högre energitäthet, samtidigt som superkondensatorer har egenskaper som hög cykelstabilitet, energiverkningsgrad och hög in- och urladdningskapacitet behålls, vilket gör att de kan bli relevanta för energilagring och balansering av elnät vid ökande andel förnybart.
- **Grafen Energi (avslutat)**, 2D fab, VestaSi, Woxna Graphite, UU, Mittuniversitet
Användning av grafen tillsammans med kisel i litiumjonbatterier för att förbättra den elektriska ledningsförmågan och anodens mekaniska styrka samt för att minska problemet med bildande av ett fast elektrolytgränssnitt (SEI). Kisel i litiumjonbatterier kan bidra till ökad lagringskapacitet.
- **Grafenbaserade självsmörjande nötningsbeständiga kompositer för lager i vattenkraft**, Vattenfall, Luleå tekniska universitet
Med hjälp av grafens extraordinära mekaniska och smörjande egenskaper ska nya nötningsbeständiga självsmörjande polymera kompositer utvecklas, som kan användas som lager tillsammans med vatten och andra typer av miljövänliga smörjmedel.
- **Utveckling, verifiering och validering av grafenmatris för solenergi- och värmedriven värmepump (avslutat)**, SaltX Technology, Chalmers Industriteknik
Utveckling av teknik för att använda grafen (integrerat med salt) för värmeledning i

energitillämpningar, som solenergi- och värmedrivna värmepumpar och termiska solfångare.

- **Grafenoxid – ett nytt smörjmedel i industriella tillämpningar (avslutat)**, ABB AB, Uppsala universitet

Utveckling av smörjningskoncept baserade på grafenoxid för industriella tillämpningar. Projektet har utvärderat grafenbaserad material (specifikt GO), som smörjande additiv i smörjfetter och i Ag-baserade elektriska kontakter samt utvärderat möjligheten att modifiera GO för att ytterligare förstärka smörjande egenskaper.

- **iEnergy – industrialisering av bläckstråletryckteknik med grafen för energilagringstillämpningar (avslutat)**, KTH, XaarJet

Uppskalning av tillverkningsteknik och tryckbarhet för grafenbläck, syftande till att utveckla industriella tryckmetoder för massproduktion av superkondensatorer.

Marknadsinriktning avser energilagring med både hög energidensitet och hög effektdensitet, för användning i t ex elfordon.

- **Tryckta grafenelektroder i högspänningsprodukter (avslutat)**, ABB, RISE Acreo

Utveckling av ledande tunna skikt, vilka med hjälp av grafen kan få optimerad ledningsförmåga, med mindre materialanvändning. Ledande tunna skikt är vanligt i många högspänningsprodukter.

- **Värmepumpsdemonstrator med grafenbelagd keramisk matris för ökad effekttäthet (avslutat)**, Climatewell AB, Chalmers Industriteknik, Chalmers

Förprojekt till projekt inriktat mot solenergi- och värmedrivna värmepumpar ovan.

Övriga projekt inom SIO Grafen som är klassade som projekt inom Styrkeområde Energi, bedöms ha sitt huvudfokus inom andra frågeställningar och områden (se lista nedan).

- Högdissipativa mikrovätskekylda elektronikförpackningar (avslutat)
- Värmeledande grafenfilm i termiska band och värmespridare för användning i radar och laser
- Värmereducerande textil HeatReTex (avslutat)
- Miniaturiserad kryokylare baserad på grafen
- Värmespridare och värmeöverförande element med grafenbaserade filmer för radar och laser (avslutat)
- Grafenförbättrad värmespridare för elektronik (avslutat)
- RF energy harvesting for M2M communication (avslutat)
- Förstudie på miniaturiserad kryokylare baserad på grafen (avslutat)

B. Anteckningar från workshop I

Den första workshopen genomfördes som en del av SIO Grafens Årsstämma den 24 april 2019 i Stockholm, med följande deltagare:

Henrik Hillborg, ABB
 Nazanin Emami, Luleå Tekniska Universitet
 Olga Santos, Alfa Laval
 Jon Wingborg, CIT
 Ingrid Nyström, CIT IE
 Peter Nilsson, APR
 Göran Bolin, SaltX
 Johan Liu, Chalmers
 Mikael Lindqvist, Energimyndigheten
 Patric Isacson, Ahlström-Munksjö
 Mats Sandberg, RISE

Syftet med workshopens diskussion var dels att identifiera grafentillämpningar som är relevanta för energibranschen samt när dessa uppskattades kunna uppnå en första marknadsintroduktion, dels att identifiera viktiga industriella aktörer för dessa tillämpningar och färdplanen. Nedanstående tabell bygger på resultaten från workshopens första del.

	Nu - 2025	2025-2030	2030 -
Elfordon		X	
Ellagring/elnät	X (superkond)	X	
Termisk energi-lagring	X		
Förnybar el		X	
Vätgas			X
Transmission/ distribution		X	
Värmeväxlare		X	
Motorer, turbiner			X
CO2-avskiljning (&biogas)			

C. Anteckningar från workshop II

Den andra workshopen genomfördes som ett självständigt arrangemang den 15 oktober 2019, i anslutning till Svenskt Grafenforum i Göteborg. Följande personer deltog:

Johan Ek Weis, Chalmers Industriteknik

Annette Wepthon, Nova Invent

Ulf Haraldsson, SIS

Anwar Ahniyaz, RISE

Eiwe Ljungblom, TiMT

Henrik Hillborg, ABB

Mats Sandberg, RISE

Mamoun Taher, Graphmatech

Ingrid Nyström, CIT Industriell Energi

Malin Jacobsson, CIT Industriell Energi

Hanna Tornevall, CIT Industriell Energi

Fokus för workshopens diskussioner samt resultat framgår av bilderna nedan. Dessa skickades efter workshopen också ut till samtliga deltagare, hela referensgruppen samt ytterligare några personer som anmält intresse för färdplansarbetet/workshopen, men inte hade möjlighet att delta den 15 oktober. I det slutliga resultatet ingick därför också kompletterande inspel från dessa.



1) Utveckling av grafen som material, generellt

Hinder för utveckling

- Svårigheter att nå ut med kommunikation om grafen – t ex ihopblandning grafen-2D
- Orealistiska förväntningar
- Svårigheter identifiera rätt områden att satsa på (satsar för brett och tunt)
- Utveckling av dåliga standarder hinner före
- Bristar i processteknik för produktion av grafen
- Tidsåtgång för att bygga kompetens
- Bristande IP-hantering vid marknadsnära diskussioner
- Bristande process för affärsutveckling
- Byråkrati

Mål – 10 års sikt

- Väletablerad grafenindustri (inom några områden, se även nedan)
- Tillgång till bra standarder för grafen som material (inom fem år)
- Grafen är etablerat som material(grupp)
- Grafen är etablerat som säkert material
- Det finns flera leverantörer av kvalitetssäkrat grafen

Insatser/aktiviteter

VAD?

Kommunikation om grafen som materialfamilj (jmf plast)

Beskriv "lessons learned" – goda och dåliga exempel

Forma en stark Swedish Graphene Alliance (?)

Involvera marknadsfolk och innovatörer

Bygg nätverk kopplat till säkerhet, t e x kemikalieinspektionen, naturvårdsverket

VEM?

SIO Grafen m fl

NÄR?

5 års sikt

2) Utveckling av grafen inom energiområdet, generellt

Många liknande föregående

Hinder för utveckling

- Industrin inte beredd att ta tidiga steg i utveckling/ användning av ny teknik
- Svårigheter att nå ut med kommunikation om grafens energirelevans
- Orealistiska förväntningar
- Svårigheter jämföra olika teknisklösningar (jämför äpplen och päron)
- Svårigheter identifiera rätt områden att satsa på – där grafen ger betydande fördelar
- Utveckling av dåliga standarder hinner före
- Tidsåtgång för att bygga kompetens

Mål – 10 års sikt

- Väletablerad grafenindustri inom några energiområden (se även nedan)
- Tillgång till bra standarder för (några) energitillämpningar med grafen
- Det finns ett starkt nätverk mellan grafen- och energiaktörer
- Energisektorn känner väl till grafens möjligheter

Insatser/aktiviteter

VAD?

Definiera tydligt inom vilka områden grafen kan göra stor skillnad

Nätverksbyggande aktiviteter riktade till energiaktörer – till exempel ... naturvårdsverket,

Kunskapsbyggande aktiviteter riktade till energiaktörer – till exempel ... spridning av färdplanen

Beskriv "lessons learned" inom energiområdet – goda och dåliga exempel

Fastställ metodik för jämförelse av teknisklösningar – ta hänsyn till hela kedjan (identifierar även svaga länkar)

Ställ krav på bedömning av (kvantitativ) energirelevans i (alla) grafenprojekt

VEM?

SIO Grafen m fl

NÄR?

5 års sikt

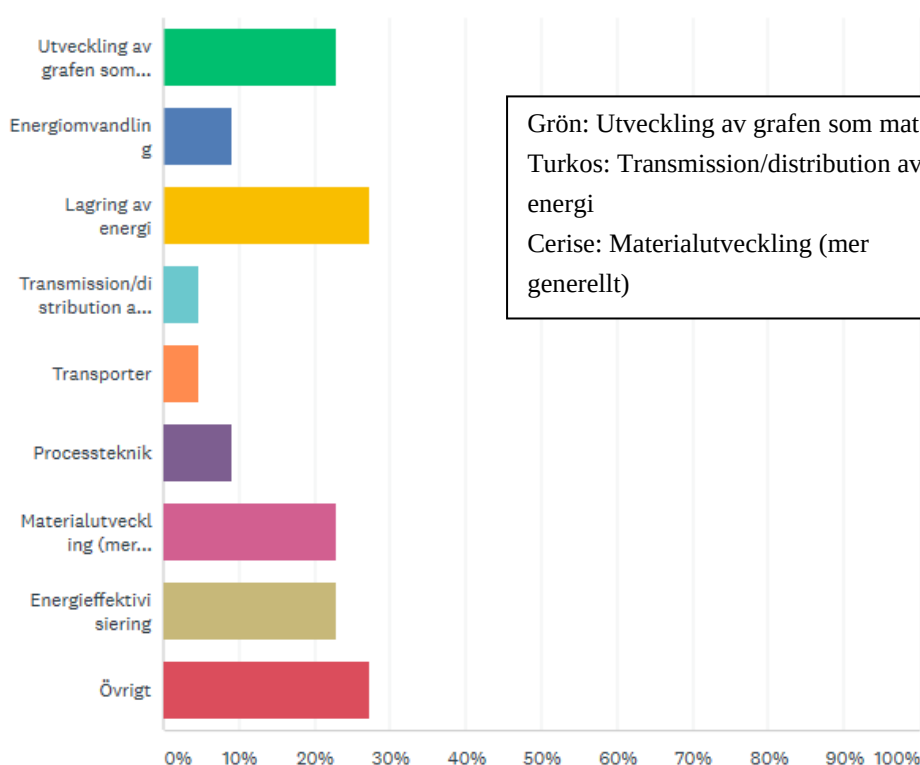


D. Enkät och enkätresultat

Enkäten bestod av totalt 10 frågor inom tre områden – kategorisering av svaranden, prioritering mellan teknologier och energitillämpningar samt aktörer. Nedan återfinns ett urval av enkätens (frågor och) resultat. Inom flertalet frågor fanns också möjligheten att lägga till fritextsvar.

Vilken av följande kategorier beskriver bäst dig/din organisation?

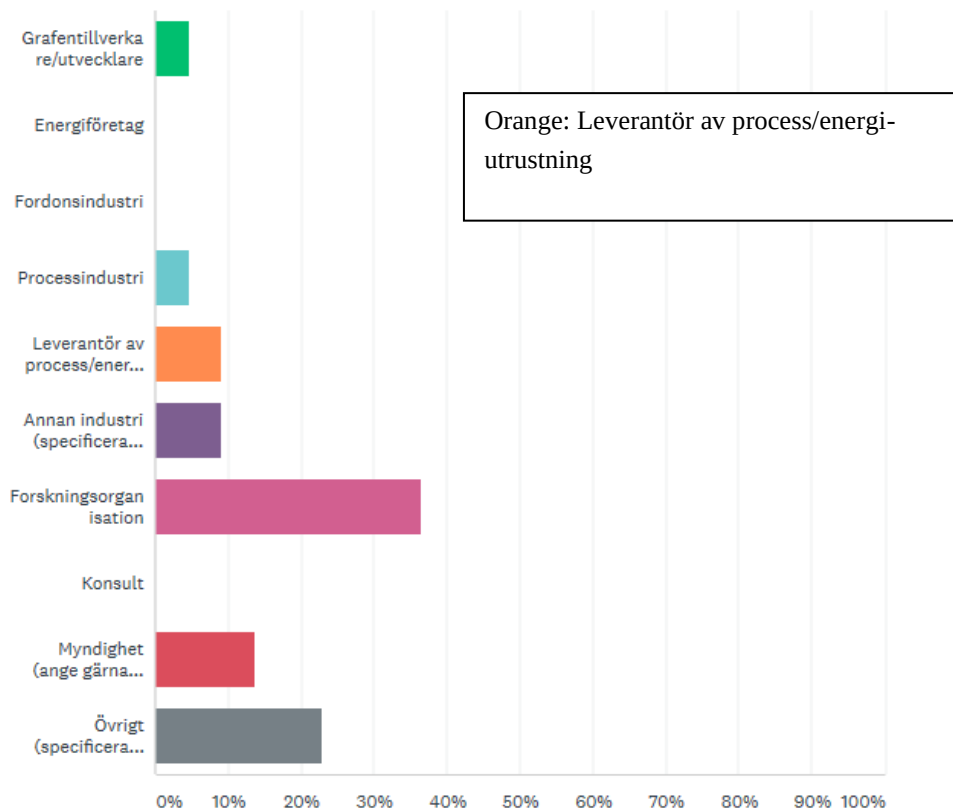
Answered: 22 Skipped: 0



Grön: Utveckling av grafen som material
Turkos: Transmission/distribution av energi
Cerise: Materialutveckling (mer generellt)

Vad är det för typ av organisation?

Answered: 22 Skipped: 0

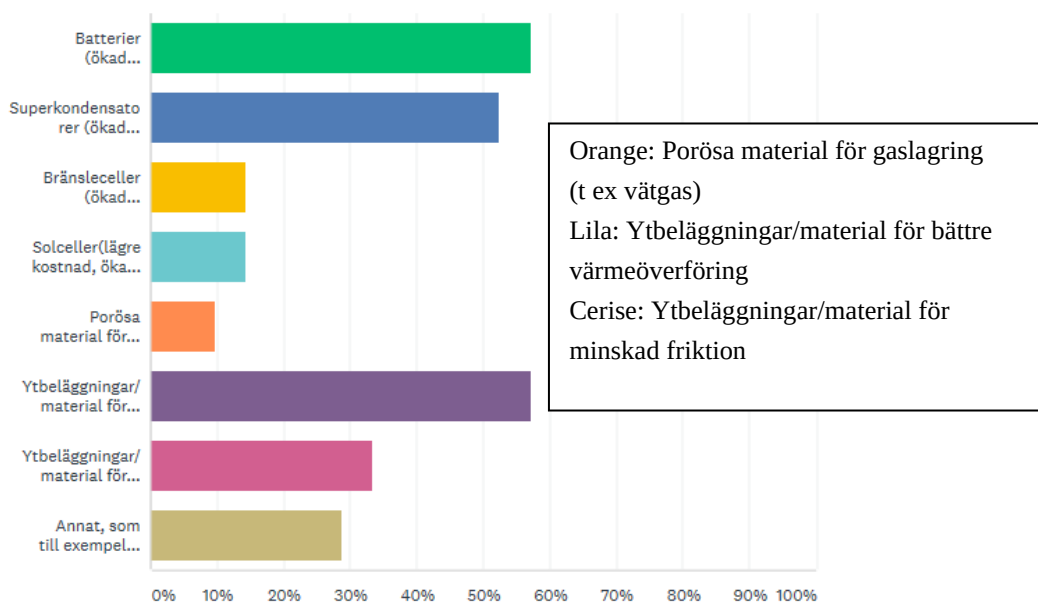


Q5

Customize Save as ▼

Vilka energirelaterade teknologier anser du är viktigast att utveckla med hjälp av grafen? För dig/din organisation. Välj max 3.

Answered: 21 Skipped: 1



Q6

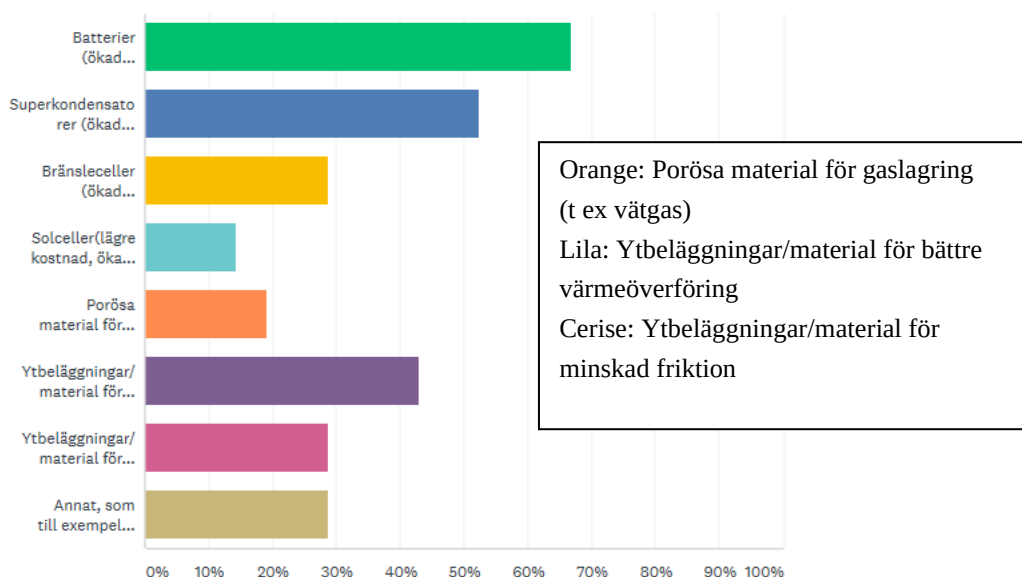


Customize

Save as ▼

Vilka energirelaterade teknologier anser du är viktigast att utveckla med hjälp av grafen? För Sverige/svensk industri. Välj max 3.

Answered: 21 Skipped: 1



Q8

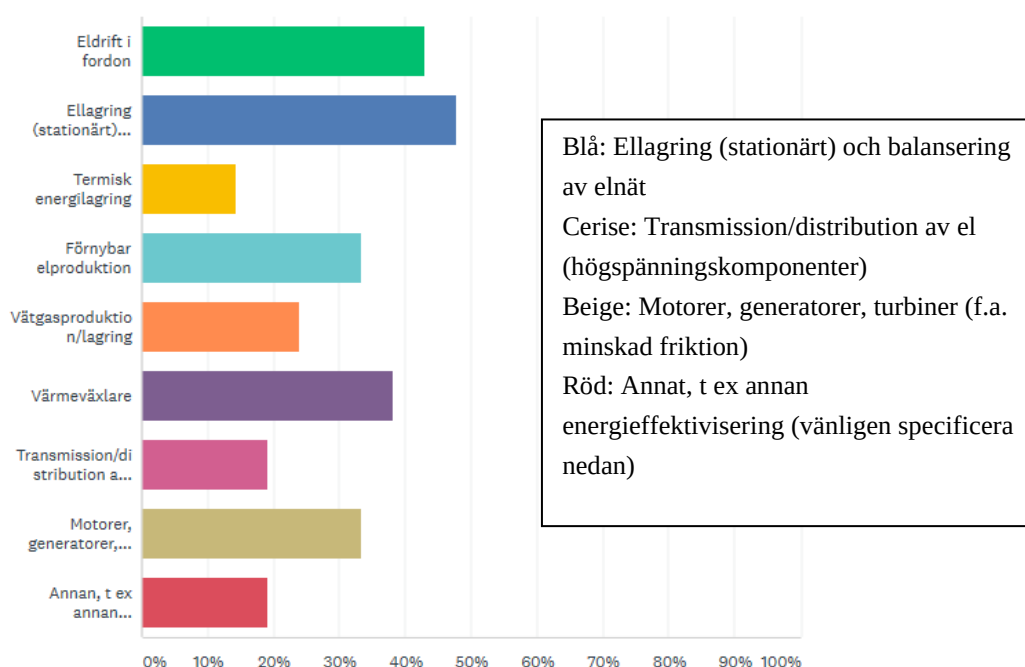


Customize

Save as ▼

Vilka energirelaterade tillämpningsområden anser du är viktigast att utveckla med hjälp av grafen? För Sverige/svensk industri. Välj max 3.

Answered: 21 Skipped: 1



Q9



Save as ▼

Vilken typ av aktörer tycker du är viktigast att involvera i det svenska arbetet med utveckling av grafen inom energiområdet?

Answered: 17 Skipped: 5

Exempel på svar:

Triple helix; hela värdekedjan; svenska elnätsägare; materialtillverkare; experter på t ex batterier och superkondensatorer; komponenttillverkare; samarbeten genom personliga möten och målinriktade diskussioner över hela värdekedjan, slutanvändare