



Baggrundsnotat 7 – Teknologiudvikling og –udbredelse

1 Indledning og formål

Teknologiudvikling og -udbredelse betegner i analysen *Danmarks globale klimaindsats* de positive klimapåvirkninger som kan opstå, når forskningsinstitutioner, virksomheder og andre aktører i det danske innovationssystem yder en særlig indsats for at tilvejebringe klimavenlige teknologier, som medfører reduktioner i udlandets drivhusgasudledninger. Der er et stort potentiale og behov for at opnå globale reduktioner ved at udvikle og udbrede anvendelsen af klimavenlige teknologier, selvom resultaterne af indsatser på området er behæftet med stor usikkerhed. Der er et stort fokus i Danmarks globale klimapolitik på at fremme grøn eksport, men de positive effekter af teknologiudvikling og -udbredelse fremkommer også på andre måder end gennem grøn eksport, som med fordel kan få større opmærksomhed i den danske klimapolitik. Det vurderes dog ikke at være hensigtsmæssigt at sætte et entydigt mål for klimabidraget fra teknologiudvikling og -udbredelse, da processerne er usikre og det er vanskeligt at observere de komplekse sammenhænge mellem årsag og effekt.

Dette baggrundsnotat indeholder en gennemgang af indsatsområdet *Teknologiudvikling og -udbredelse* med et hovedfokus på energiteknologi. Området gennemgås ved brug af Klimarådets metode til at vurdere, hvordan en international klimaindsats bedst kan indgå i en revideret klimalov. Metoden er beskrevet i kapitel 2 i Klimarådets analyse *Danmarks globale klimaindsats* fra november 2023.

I Klimarådets metode anvendes seks kriterier til at vurdere, om der kan sættes et pejlemærke eller et mål for CO₂e-reduktion på de enkelte indsatsområder i Danmarks globale klimapåvirkning, eller om der alene bør gøres en indsats for at øge en positiv effekt eller mindske en negativ effekt af denne. De seks kriterier er:

1. Potentiale for CO₂e-reduktioner
2. Behov for tilskyndelse til handling
3. Metoder til at monitorere
4. Definition af langsigtet retning
5. Klar definition af målet
6. Grad af kontrol over udviklingen

2 Kriterier for, hvordan indsatsområdet kan styrkes i de klimapolitiske rammer

I dette afsnit gennemgås de enkelte de enkelte kriterier for, hvordan indsatsområdet kan styrkes i de klimapolitiske rammer.

2.1 Potentiale for CO₂e-reduktioner

Der er i dette kriterium tale om et væsentlighedskriterie, som især handler om, hvor mange ton CO₂e der potentielt kan reduceres på området. Klimarådet klassificerer potentialet ud fra lille, medium, stort og meget stort i rapporten *Danmarks globale klimaindsats*.

Teknologiudvikling og -udbredelse er nødvendig for at overholde Parisaftalens temperaturmål

Teknologiudvikling og -udbredelse er med rette i fokus for den grønne omstilling. Adfærdsændringer er vigtige for at reducere CO₂e-aftrykket af den globale økonomiske aktivitet, men store teknologiske landvindinger er også nødvendige for at overholde Parisaftalen.¹ Nye klimavenlige teknologier tilvejebringes og får effekt gennem innovationsprocesser, som løber over stadier med tiltagende modenhed fra forskning, udvikling og demonstration til markedsmodning og sidenhen til omfattende udbredelse i økonomien.² Ved at muliggøre produktion af de samme varer og services med færre CO₂e-udledninger, mindskes behovet for at skifte produktions- og forbrugsmønstre, hvilket kan øge den politiske opbakning til en hurtigere omstilling, samt potentielt medføre besparelser i visse sektorer, herunder inden for elproduktion og vejtransport.³ Omvendt, kan idéen om fremtidige teknologiske løsninger risikere at begrænse villigheden til at fremme den grønne omstilling på kort sigt, hvorfor klimapolitikken både bør indeholde et implementerings- og et udviklingsspor (uddybes i afsnit 2.2 i dette baggrundsnotat).⁴

Der er et stort behov og potentiale for teknologisk udvikling. Eksempelvis, forventer det Internationale Energiagentur (IEA) i sit opdaterede scenarie for en omstilling i overensstemmelse med Parisaftalen, at 35 pct. af de krævede reduktioner vil komme fra teknologier som i dag enten er i prototype- eller demonstrationsfasen.⁵ 20 pct. af reduktionerne forventes at komme fra fuldt modne teknologier, mens lidt over 40 pct. vil ske gennem mindre modne teknologier, som er ved at vinde udbredelse i nichemarkeder. IEA's scenarie kræver derfor store investeringer i udvikling og ibrugtagning af teknologier, som bidrager til at opnå klimaneutralitet.

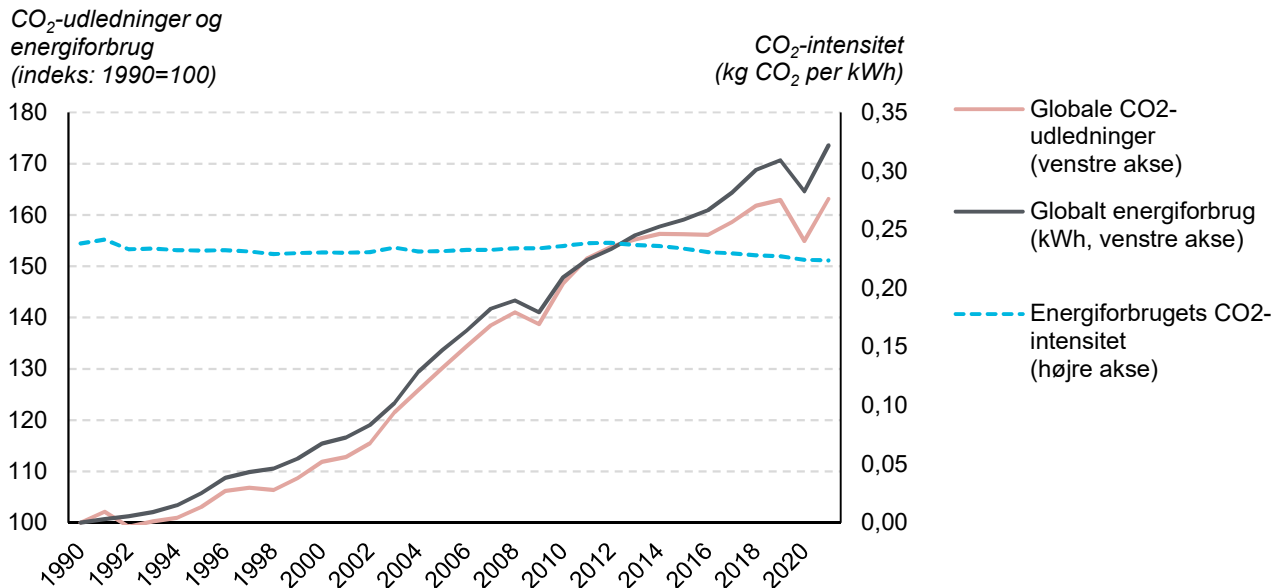
Omstillingen til et klimaneutralt samfund rummer økonomiske muligheder

Investeringer i teknologiudvikling og -udbredelse vil samtidig muliggøre omfattende besparelser gennem et mindre forbrug af fossile brændsler, hvorfor IEA konkluderer, at verden i 2050 vil have sparet 12.000 milliarder dollars (uden diskontering) ved at opnå klimaneutralitet relativt til et scenarie med den nuværende omstillingshastighed. Omkostningsreduktioner inden for solenergi, vindenergi og elbiler har allerede vist, hvordan væsentlige elementer af den grønne omstilling kan åbne muligheder for besparelser for samfundet.³ Danmark har derfor både et reduktionsmæssigt og et økonomisk potentiale for fortsat at bidrage til udviklingen og udbredelsen af klimavenlige teknologier. Danmark har historisk bidraget til at udvikle og modne en del af de teknologier, som i dag bidrager til at mindske udledningerne, blandt andet vindenergi, og Danmark kan potentielt også gøre en forskel for udviklingen af de næste generationer af klimavenlige teknologier.⁶

CO₂-udledninger afkobles fra energiforbruget, men der er behov for markant højere tempo

Figur 1 viser at verdens energiforbrug og CO₂-udledninger har fulgt hinanden tæt fra 1990 til 2012, hvorefter der er sket en relativ afkobling, hvormed energiforbrugets CO₂-intensitet er begyndt at falde. Afkoblingen har dog endnu ikke været tilstrækkelig til også at reducere de absolutte udledningerne. Den faldende CO₂-intensitet i energiforbruget kan i høj grad tilskrives teknologiudvikling og -udbredelse ved at sol- og vindenergi er blevet en stigende del af energiforsyningen. Den tiltagende udbredelse af elbiler og varmepumper kan forventes at bidrage til tendensen, mens mulige løsninger begynder at tegne sig for sektorer hvis udledninger ofte betegnes som svære at reducere, herunder stål, cement og international transport. Et lavere energiforbrug og adfærdsændringer kan fremskynde tidspunktet, hvor klimaneutralitet opnås. Alligevel vil det være nødvendigt, at energiforbrugets CO₂-intensitet nærmer sig nul, hvilket kræver omfattende udvikling

og udbredelse af klimavenlige teknologier. Nogle beregninger viser, at faldet i den globale økonomis CO₂-intensitet skal foregå fem til syv gange hurtigere end i de seneste år for at nå Parisaftalens 1.5°C-graders målsætning.⁷



Figur 1 Sammenhæng mellem globale CO₂-udledninger og globalt energiforbrug 1990-2021

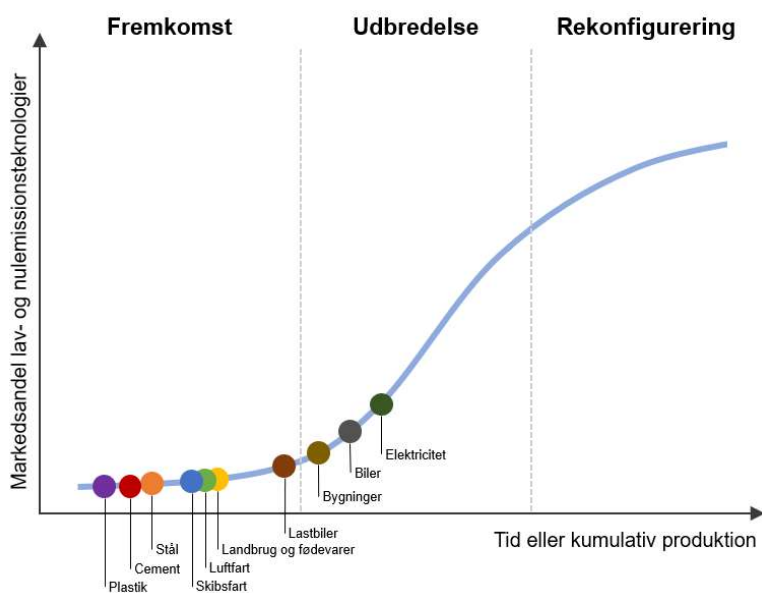
Anm.: CO₂-udledninger og energiforbruget er indekseret til værdien 100 i 1990. CO₂-udledningerne var 63 pct. større i 2021 end i 1990 og energiforbruget var 74 pct. større i 2021.

Kilde: Our World in Data⁸ på baggrund af *The Global Carbon Project* og *Energy Institute Statistical Review of World Energy*.

Økonomiens sektorer skal omstilles til klimaneutralitet gennem tre faser

Succesfuld udvikling og udbredelse af teknologier i en sektor finder typisk sted langs en S-formet kurve, der løber gennem tre modningsfaser, se figur 2:⁹

- **I fremkomstfasen** er der en eksperimenterende søgen efter løsninger med potentiale for at løse sektorens udfordringer, og som på sigt vil kunne klare sig på de gældende markedsvilkår. I denne indledende fase opnår lav- og nulemissions-teknologier kun en lille markedsandel.
- **I udbredelsesfasen** sker en acceleration af brugen af visse teknologier på nichemarkeder, og der opnås efterhånden moderate til høje markedsandele. Hastigheden i omstillingen stiger blandt andet fordi produktionserfaring (*learning-by-doing*) fremmer kvaliteten og ydeevnen af produkterne, større skala i produktionen sænker enhedspriserne, og netværkseffekter og udvikling af komplementære teknologier fremmer værdien af at tilvælge den nye teknologi.¹⁰
- **Til sidst når omstillingen rekonfigureringsfasen**, hvor sektorens rammevilkår, institutioner og standarder ændres til at tage udgangspunkt i de nye teknologier og dermed facilitere et næsten fuldkomment markedsoptag af klimavenlige løsninger.



Figur 2 Sektorstatus og typiske tidsforløb for udvikling og udbredelse af lav- og nulemissionsteknologier

Anm.: Der er foretaget mindre justeringer af sektorenes placering sammenlignet med kildens originale figur for at afspejle udviklingen siden 2019.

Kilde: Victor, Sharpe & Geels (2019)¹¹

Få sektorer er i færd med udbredelsen af grønne løsninger, mens flere befinder sig i fremkomstfasen

I dag er omstillingen af elsektoren længst fremme på grund af udviklingen af moderne vind- og solenergi, men omstillingen kræver fortsat markant udbredelse af teknologierne samt komplementerende teknologier til at skabe fleksibelt forbrug og produktion, som illustreret i figur 2. Omstillingen af bilbestanden og opvarmning af bygninger er også i gang med udbredelsesfasen blandt andet i kraft af udviklingen af elbiler og varmepumper, som kobles op på omstillingen af elsektoren via elektrificering. Den tunge vejtransport ser i stigende grad ud til at også at benytte direkte elektrificering ved at udnytte den udvikling af batteriteknologi, som elbilerne har medført.

De resterende sektorer, der omfatter cement, stål, plastik, landbrug og arealanvendelse, luffart og skibsfart, er stadig i fremkomstfasen. Det kan derfor have en stor effekt på den globale omstilling, hvis der igangsættes indsatser, der kan skubbe disse sektorer videre i fremkomst- og udbredelsesfaserne. Hertil kommer at IPCC og klimaforskere forventer et globalt behov for at opnå negative udledninger for at kompensere for den nuværende utilstrækkelige forventede reduktionssti, samtidig med at der er bekymringer om at idéen om fremtidige negative udledninger kan mindske reduktionen af drivhusgasudledninger.¹²

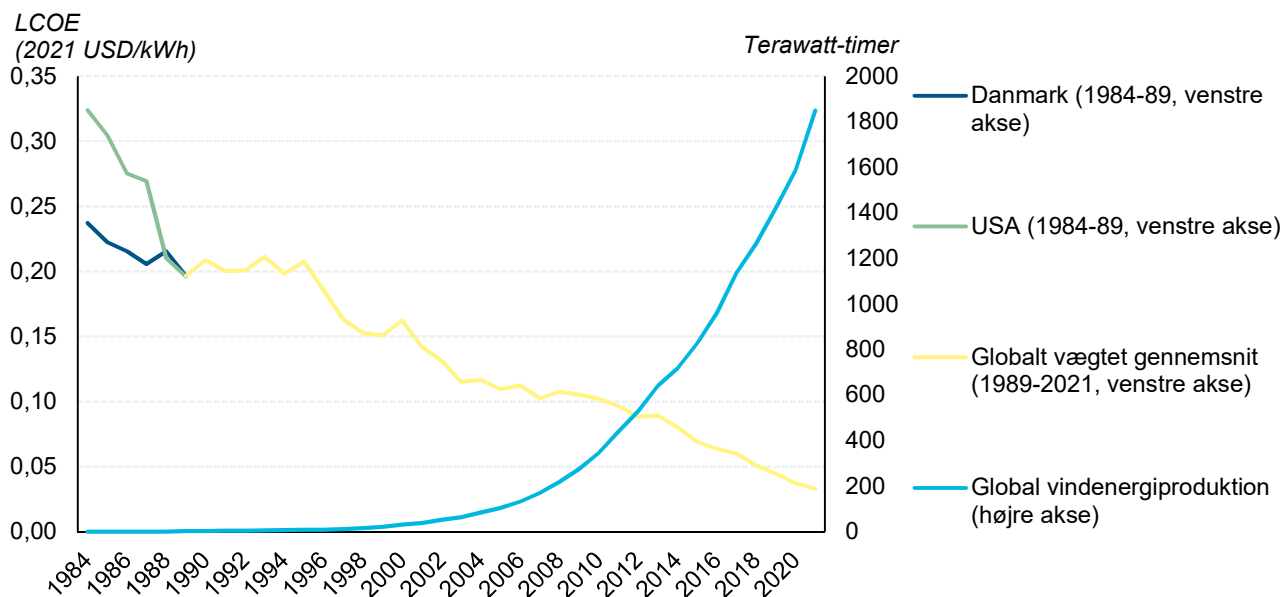
Teknologier i udbredelsesfasen har udvist store skala- og læringsfordele

De teknologiske løsninger inden for produktion af elektricitet og elbiler har opnået store omkostningsreduktioner over de seneste 20 år. Teknologierne beror ofte på varierende grader af masseproduktion og modulbaserede designs, hvilket kan give potentiale for at opnå skala- og læringsfordele.¹³ Dette står i modsætning til de stigende marginale omkostninger, der kan opstå for fossile energikilder, når øget forbrug kræver, at energien skal udvindes og transporteres under stadig sværere og omkostningstunge forhold.¹⁴ Disse karaktertræk er blandt andet baggrunden for, at omkostningerne for solenergi og landvind er faldet henholdsvis 83 pct. og 63 pct. siden 2009 i takt med øget ibrugtagning.¹⁵ Omkostningerne er ligeledes faldet støt for batterier og produktion af grøn brint gennem elektrolyse langs 'læringskurver', som kendetegnes af stabile procentvise forhold mellem øget udbredelse og omkostningsreduktioner.¹⁶ Det er dog ikke en selvfølge, at prisen falder over tid, eftersom kernekraft vurderes at være blevet 47 pct. dyrere siden 2009, mens omkostningen for geotermisk energi både er gået op og ned i perioden. Omkostningerne forbundet med vedvarende

energiteknologier er desuden afhængige af priserne for blandt andet metaller og finansiering, hvorfor omkostningerne i perioder kan presses op af disse faktorer.

For teknologier som følger en læringskurve falder omkostningerne med en omtrent stabil læringsrate (opgjort i pct.) for hver gang udbredelsen af teknologien fordobles. De specifikke teknologier på en læringskurve vil dog typisk afvige fra kurven i kortere perioder med enten hurtigere eller langsommere omkostningsreduktioner. Den omtrent faste procentvise omkostningsreduktion per fordobling af udbredelsen betyder, at man, opgjort i kroner, vil se de største omkostningsreduktioner i starten af udbredelsen og at de årlige omkostningsreduktioner typisk vil falde over tid. Derfor lægger forskere i omstilling af sektorer til bæredygtighed stor vægt på at fremme nichemarkeder for bæredygtige teknologier for at afklare potentialet for at teknologierne kan opnå en stejl læringskurve med hurtige omkostningsreduktioner.¹⁷ Usikkerheden herom betyder dog, at der er risiko for at bruge mange ressourcer uden innovationsmæssig succes, samtidig med at opbakningen til den politiske indsats kan blive begrænset, hvis de økonomiske gevinster ikke opnås af hjemlige teknologiudviklere og -producenter. Erfaringen med udvikling af vindenergi viser dog, at Danmark har muligheder inden for teknologiudvikling

Historien om Danmarks rolle i udviklingen og udbredelse af vindenergi viser, at små lande kan have en betydelig påvirkning på teknologiudviklingen over tid, som blandt andet tænketanken DEA og Det Innovations og Forskningspolitiske Råd har belyst gennem historiske analyser.¹⁸ Danmark er anerkendt i forskningen for at have ført en succesfuld innovationspolitik inden for vindenergi.¹⁹ Derigennem har aktører i det danske innovationssystem ydet et centralt bidrag til, at omkostningerne er reduceret med ca. 90 pct. siden 1984 (fra 0,32 til 0,03 dollars pr kWh), som vist i figur 3.²⁰ Det tog mange år med ibrugtagning i nichemarkeder og inkrementelle omkostningsreduktioner før den globale produktion af vindenergi accelererede eksponentielt til cirka 1850 terawatt-timer i 2021. Den øgede udbredelse, særligt siden slutningen af 00'erne, har medvirket til faldet i energiforbrugets CO₂-intensitet (figur 1).



Figur 3 Faldende omkostninger for landvindenergi og eksponentiel vækst i produktionen

Anm. Omkostningen ved de opstillede projekter er opgjort som *levelised cost of electricity* (LCOE), som sammenregner produktionen af elektricitet og installations- og driftsomkostninger over anlæggets levetid. Udgifterne og produktionen diskonteres med forskellige renter baseret på IRENA's vurdering af de finansielle forhold. For OECD-lande og Kina antages en rente på 7,5 pct. frem til 2010 og et efterfølgende fald til 5 pct. i 2020. For andre lande antages en rente på 10 pct. frem til 2010 og herefter et løbende fald til 7,5 pct. i 2020. Den globale vindenergiproduktion inkluderer både land- og havvind. Vindenergiproduktionen er både fra land- og havvind. Der var i 2022 installeret 835 GW landvindskapacitet og 63 GW havvindskapacitet.

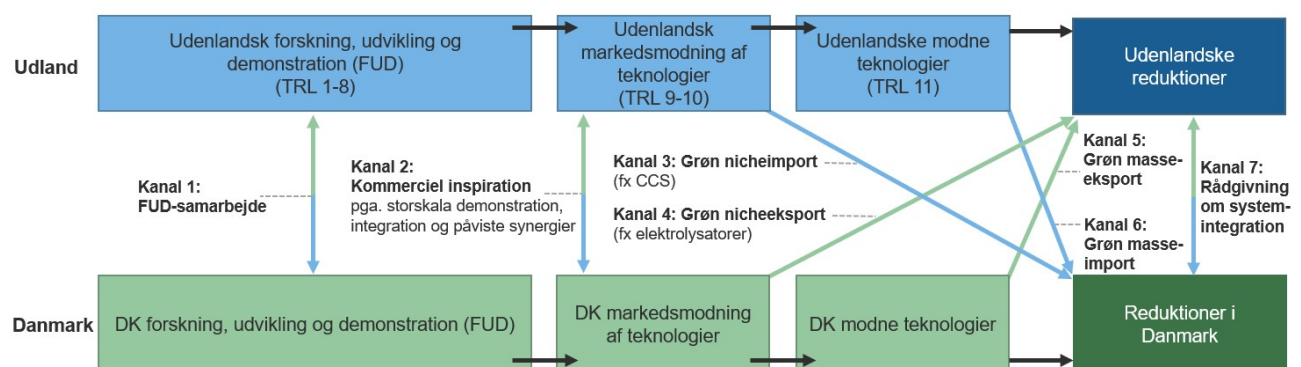
Kilde *International Renewable Energy Agency's Renewable Cost Database*²¹ og *Our World in Data* på baggrund af data fra *Ember* og *Energy Institute Statistical Review of World Energy*.²²

Historien om Danmarks rolle i udviklingen af moderne vindenergi viser, at små landes potentiale for at påvirke den globale teknologiudvikling kan være stor, hvis der investeres i den tidlige fase af en sektors grønne teknologiudvikling, hvormed der kan opbygges pionerfordele gennem tidlige erfaringer. Siden påbegyndelsen af førerpositionen inden for vindenergi, har både stat og virksomheder brugt mange midler på at understøtte den produktionsmæssige førerposition med en omfattende indsats inden for forskning og udvikling for at gøre vindmøllerne stadigt mere avancerede.²³ Flere danske tænketanke har vurderet, at Danmark klarer sig godt angående grøn innovation, blandt andet ved at vurdere antallet og kvaliteten af grønne patenter.²⁴ Det er især grønne patenter inden for vindenergi, som giver Danmark sin internationale styrkeposition.²⁵

Danmarks bidrag til udviklingen af moderne vindmøleteknologi er dog sket i en kontekst af relativt lave globale ambitioner for grøn innovation, hvorfor Danmarks innovationssystem har haft mindre konkurrence i forbindelse med sin specialisering i vindenergi. De øgede globale ambitioner siden Parisaftalen i 2015 kan både betyde, at Danmark får sværere ved at opnå nye, selvstændige specialiseringer, fx inden for power-to-X eller fremstilling af kunstigt kød og mælkeprodukter, men også at der vil være bedre muligheder for at skabe grøn innovation gennem internationalt samarbejde.

Der er flere kanaler til at påvirke de globale udledninger gennem udvikling og udbredelse af teknologi

I Danmarks globale klimapolitik er der stort fokus på at fremme grøn eksport. Der er dog flere gensidige påvirkningskanaler mellem danske aktiviteter inden for teknologiudvikling og udlandet end den grønne eksport, som illustreret i figur 4. Modningsprocessen kan karakteriseres ved IEA's udgave af *technology readiness-skalaen* med såkaldte TRL-niveauer fra 1-11.²⁶ Skalaen løber fra de umodne stadier for forskning, udvikling og demonstration (TRL 1-8), til markedsmodning, hvor der fortsat er behov for udvikling og større udbredelse for at opnå konkurrencedygtighed (TRL 9-10), og endelig fuldt modne og kommercielle produkter, der er konkurrencedygtige og relativt forudsigeligt bidrager til at skabe drivhusgasreduktioner (TRL 11).



Figur 4 Oversigt over syv primære indflydelseskanaler på området for grøn innovation

Anm. Modningsprocessen for teknologier kan karakteriseres ved hjælp af IEA's skala over *technology readiness levels* (TRL) bestående af 11 TRL-niveauer. Skalaen er mest anvendelig for komponentbaserede teknologier, hvilket ofte er tilfældet på energiområdet, mens den fx kan være mindre brugbar til beskrivelser af teknologier inden for sundhed- eller fødevarerområdet. For visse teknologier med sociale indvirkninger kan det også være brugbart at inddrage vurderinger af samfundsmæssig parathed, eller *societal readiness levels*.²⁷

Kilde Klimarådets tilvirkning på basis af IEA's TRL-skala.

Der er et stort politisk fokus på at fremme grøn eksport af modne teknologier, hvad der kan betegnes som masseeksport. Men det er kun en ud af flere måder Danmark kan anvende teknologiudvikling og -udbredelse til at skabe globale reduktioner. Figur 4 illustrerer at området kan have positiv international klimaeffekt gennem (minimum) syv indflydelseskanaler:

1. **Samarbejde om forskning, udvikling og demonstration.** Internationalt samarbejde mellem forskere og virksomheder giver bedre adgang til eksisterende viden, samt skaber nye muligheder for fremskridt.
2. **Kommerciel inspiration.** Virksomheder og investorer, der ser nye teknologiske løsninger fungere i stor skala i udlandet, kan opnå større tiltro til lignende satsninger i andre lande.
3. **Grøn nicheimport.** Ved at importere nicheprodukter med lav udbredelse skabes der muligheder for blandt andet læring og skalafordele i udlandet.
4. **Grøn nicheeksport.** Ved at eksportere nicheprodukter med lav udbredelse er der færre alternative udenlandske leverandører til den grønne løsning, hvorfor additionaliteten ved eksporten kan være større end ved masseeksport. Omsætningen betyder desuden at mulighederne for at investere i yderligere innovation i Danmark forbedres.
5. **Grøn masseeksport.** Masseeksport af modne teknologier kan have små positive klimaeffekter i udlandet på grund af en lille additional effekt på udledningerne sammenlignet med produkter fra alternative udenlandske leverandører, som beskrevet i hovedanalysens afsnit 5.2.
6. **Grøn masseimport.** Masseimport af modne teknologier har små innovationseffekter i udlandet pga. den relativt lille forøgelse af den samlede globale efterspørgsel, som Danmarks forbrug kan medføre. Importen, fx af elbiler, kan dog medføre store territoriale reduktioner i Danmark.
7. **Rådgivning om systemintegration.** Teknisk rådgivning om systemintegration af nye teknologier medvirker til at øge mulighederne for udbredelsen af klimavenlige teknologier. Dette beror på Danmarks evne til at fremme systemisk ibrugtagning hurtigere end i udlandet, for eksempel gennem en høj andel af energi fra sol og vind eller facilitering af fremtidens mere fleksible strømforbrug.

Opsummerende kan det konkluderes, at der er et stort potentiale for at bidrage til globale reduktioner gennem teknologiudvikling og -udbredelse, hvor der er flere mulige kanaler, som over tid kan påvirke udlandets udledninger. Det er vanskeligt at vurdere, hvor stort et bidrag et lille land som Danmark kan opnå, men Danmarks historiske rolle inden for udviklingen af vindenergi og teknologier der øger energieffektiviteten giver anledning til en vis optimisme.

2.2 Behov for tilskyndelse til handling

Kriteriet om behovet for tilskyndelse henviser til, om der for nuværende er en mangel på private eller offentlige tilskyndelser for at handle på området, og hvor Klimarådet vurderer, at der med fordel kan gøres en indsats på området.

Teknologiudvikling og -udbredelse er et vigtigt politisk indsatsområde

Klimarådet skelner mellem to politiske spor, som bidrager til at opnå Danmarks klimamål:²⁸

- **Implementeringssporet** sørger for, at kendte teknologier tages i brug i et hurtigere tempo, fx gennem skift til elbiler og varmepumper.
- **Udviklingssporet** kræver derimod udvikling af nye og mere ukendte omstillingselementer, hvor uprøvede teknologier skal i spil, og hvor danskernes vaner og forbrug skal ændres mere gennemgribende i en klimavenlig retning. Dette spor kræver investering i den strategiske udvikling og planlægning af, hvordan disse nye omstillingselementer kan bidrage til at opnå vores klimamål og en lang række politiske tiltag til at sørge for, at nye teknologiske løsninger på sigt bliver en del af implementeringssporet.

Udviklingssporet bidrager ikke kun til opnåelsen af Danmarks territoriale klimamål, men også positivt til Danmarks indsats for at reducere de globale udledninger af drivhusgasser. Dansk forskning, udvikling, demonstration og tidlig ibrugtagning af nye klimavenlige teknologier kan bidrage på flere måder til at forstærke tilsvarende aktiviteter i udlandet og reducere CO₂e-intensiteten af udenlandske aktiviteter. Dansk teknologiudvikling og -udbredelse kan derfor bidrage til klimalovens ambition for Danmark om at være et foregangsland, som kan inspirere og påvirke resten af verden og bidrage til at løfte Danmarks historiske og moralske ansvar for at gå forrest.²⁹

Klimarådets vurdering af vigtigheden af udviklingssporet er desuden i overensstemmelse med IPCC, som konkluderer med stor sikkerhed, at forbedring af teknologiske innovationssystemer er afgørende for at accelerere en bred ibrugtagning af klimavenlige teknologier, samt at det internationale samarbejde kan forbedres på flere områder.³⁰

Barrierer bremser udviklingen af grønne teknologier og bevarer fossil afhængighed

Grønne teknologiers potentiale for at føre til store omkostningsreduktioner hæmmes af en række generelle forhold, som fastholder afhængigheden af fossil energi. Grønne teknologier starter langt fra en konkurrencedygtig position sammenlignet med eksisterende fossile teknologier, hvilket modvirker at selvforstærkende effekter mellem ibrugtagning og omkostningsreduktioner træder i kraft og fører til øget anvendelse af klimavenlige teknologier i sektorerne.³¹ Dette afspejles fx i det lange forløb med omkostningsreduktioner for vindenergi inden udbredelsen begyndte at stige kraftigt, som fremgår af figur 3.

Den manglende konkurrencedygtighed er i udgangspunktet ét økonomisk forhold blandt flere fysiske, økonomiske og sociale forhold, der bidrager til en såkaldt fastlåshed til fossil energi ('*carbon lock-in*').³² Fastlåshed til fossil energi er kendetegnet ved, at fossile teknologier fastholder en høj markedsandel for over tid, fordi det opfattes mere attraktivt af økonomiske og politiske beslutningstagere at effektivisere det eksisterende system baseret på fossil energi frem for at foretage en langsigtet og mere gennemgribende omstilling til alternative energiformer. Dette skyldes til dels en for lav beskatning af omkostningerne ved CO₂-udledning, men også andre forhold.

Andre forhold, der bidrager til denne fastlåshed til fossil energi, inkluderer den eksisterende infrastruktur (fx om der er togbaserede alternativer til luftfart, eller om der er rørledninger til naturgas eller fjernvarme), eksisterende netværkseffekter (fx at der er kort distance til at tanke sin fossile bil eller et langsigtet brugtvoغنsmarked at sælge til pga. mange brugere), og sociale normer og adfærdsmønstre (fx manglende kendskab til konkrete erfaringer med elbiler eller solceller på tagene). Forskere mener, at fastlåshed til fossil energi er en særligt svær form for teknologisk retning at bryde på grund af de klimavenlige alternativers store kapitalomkostninger, som skærper finansieringsbehovet, den fossile infrastrukturens lange levetid, hvilket giver en langsom automatisk udskiftningsrate, og sammenknytningerne mellem de tekniske og sociale systemer. Disse sammenknytninger opstår blandt andet gennem livsstile (fx den sociale status associeret med luftfart), institutioner (fx eksisterende regulering tilpasset fossil teknologi) og de eksisterende produktionsformers politiske indflydelse.³³

Historien viser, at det tager lang tid og kræver understøttende politik at vende de selvforstærkende effekter fra en situation, hvor fossil energi fastholdes til en situation hvor klimavenlige teknologier foretrækkes. Men historien viser også, at forandringer kan ske hurtigt, når disse 'tippingepunkter' nås, og klimavenlige alternativer bliver mere attraktive.³⁴ Dette taler for at prioritere en vedvarende og ambitiøs indsats i Danmark inden for teknologiudvikling og -udbredelse, selvom det er uklart, hvilke klimabidrag, de enkelte indsatser og projekter medfører. For at minimere risikoen for at indsatser for teknologiudvikling slår fejl, anbefaler OECD at diversificere risikoen ved at understøtte en portefølje af forskelligartede løsninger på den samme samfundsmæssige udfordring.³⁵

På en mere skematisk vis, kan man sondre mellem tre typer af barrierer for udviklingen og udbredelsen af klimavenlige teknologiske løsninger: klassiske markedsfejl, strukturelle systemfejl og transformationsmæssige systemfejl, som uddybes i tabel 1 og i de følgende afsnit.³⁶ Disse barrierer medfører, at området for grøn forskning og innovation opererer langt fra et teoretisk udgangspunkt i perfekte markeder, hvilket medfører et behov for, at man fra politisk side tilskynder til handling.

Tabel 1 Barrierer for en teknologi-drevet begrænsning af klimaforandringerne

Barrierer	Beskrivelse
Klassiske markedsfejl	
<i>Ekstern påføring af omkostninger ved produktionen</i>	Udledningen af drivhusgasser og andre former for forurening betales kun delvist gennem afgifter og CO ₂ -kvoter.
<i>Eksterne gevinster ved investeringer i forskning og udvikling</i>	Private forsknings- og udviklingsudgifter kommer ikke eksklusivt virksomhederne selv til gode og underprioriteres derfor.
<i>Informationsmangel og -asymmetri</i>	Investorer har begrænset forståelse af langsigtede risici og nye teknologiers nuværende og fremtidige ydeevne. Adfærdsmæssige forhold fører til for lille opmærksomhed på at tilegne sig denne viden.
Strukturelle systemfejl	
<i>Infrastrukturfejl</i>	Omstillingen kræver koordination af flere gensidigt afhængige netværk og systemer, ikke kun justerede handlinger af individuelle aktører
<i>Institutionelle fejl</i>	Formelle institutioner (love, regulering og sagsbehandling) og uformelle institutioner (normer, værdier og kultur) hæmmer innovationsprocesser.
<i>Netværksfejl</i>	For meget eller for lidt interaktion mellem aktører.
<i>Kapabilitetsfejl</i>	Mangel på de påkrævede kompetencer og ressourcer for at kunne skabe læring over tid.
Transformationsmæssige systemfejl	
<i>Retningsfejl</i>	Innovationssystemer gives ikke tydelig nok strategisk retning til at skabe løsninger på samfundsproblemer.
<i>Efterspørgselsfejl</i>	Nuværende og fremtidige brugerbehov artikuleres ikke tydeligt nok i markedet til at påvirke udbuddet af løsninger.
<i>Policy koordinationsfejl</i>	Manglende sammenhæng mellem politik på forskellige administrative niveauer og på tværs af sektorer.
<i>Refleksivitetsfejl</i>	Der læres ikke tilstrækkeligt af eksisterende og forhenværende regulering på politisk og administrativt plan.

Kilde: Klimarådets tilvirkning på baggrund af Stern (2022)³⁷ og Capasso, Hansen, Heiberg, J., Klitkou, K., Steen, M. (2019).³⁸

Klassiske barrierer for forskning og udbredelse af klimavenlige teknologier kræver politisk handling

Klassiske markedsfejl i relation til grøn innovation består særligt i forhold, der medfører, at den enkelte aktør i økonomien ikke tager tilstrækkeligt hensyn til resten af samfundets ønsker og behov. Klimarådet har eksempelvis anbefalet en høj og ensartet CO₂e-afgift med henblik på at rette op på den klassiske markedsfejl, at CO₂e-udledere ikke betaler nok for den klimaforandring, deres udledninger medfører.³⁹ Med bedre prissætning af denne eksterne påføring af omkostninger ved produktionen skabes der samtidig et stærkt økonomisk incitament til at vælge mere klimavenlige produkter og produktionsformer, hvilket også øger incitamentet til private investeringer i udvikling af klimavenlige teknologier.

Det er også en udbredt anbefaling i den økonomiske og innovationsorienterede forskning at øge den offentlige støtte til forskning og udvikling for at overkomme, at private virksomheder ikke kan forvente at opnå alle gevinsterne selv ved deres investeringer i forskning og udvikling.⁴⁰ Den begrænsede mulighed for at nyde hele gevinsten af egne investeringer medfører, at der bliver underinvesteret i teknologiudvikling i forhold til, hvad der er samfundsøkonomisk hensigtsmæssigt.

Strukturelle og transformationsmæssige barrierer for grøn teknologiudvikling og -udbredelse

Strukturelle systemfejl og transformationsmæssige systemfejl er særligt relevante for mindre modne teknologier og industrier.⁴¹ Her er der grund til at forvente flere og kraftigere barrierer, som modvirker, at umodne grønne teknologier kan kommercialiseres og bidrage til omstillingen af sektorerne. De strukturelle systemfejl vedrører behovet for at have gunstige strukturelle vilkår for at udføre grøn innovation, herunder understøttende infrastruktur, lovgivning og samarbejdspartnere i innovationssystemet. Transformationsmæssige systemfejl omhandler situationer, hvor innovationssystemet ikke får tydelig nok strategisk retning og efterspørgselsforhold til at frembringe innovationer af mere radikal karakter til at adressere større samfundsproblemer.

Disse former for barrierer kan eksempelvis medføre, at en høj ensartet CO₂-afgift og støtte til forskning og udvikling ikke er nok til at opnå en omkostningseffektiv omstilling over tid. Eksempelvis, ville det da Tyskland begyndte at støtte ibrugtagning af solenergi i år 2000 have krævet en CO₂-afgift på cirka 700 dollar per ton, eller cirka 5.600 kroner, at gøre solenergi konkurrencedygtigt med kulkraft.⁴² Der var derfor behov for på anden vis at adressere denne transformationsmæssige 'efterspørgselsfejl', der blandt andet forhindrede opnåelse af gevinster ved skalafordele og læring i produktionen. Ved at støtte produktion af solenergi direkte blev Tysklands årlige udvidelse af solenergikapaciteten tidoblet mellem 2004-2010. Beregninger viser, at cirka 75 pct. af omkostningsreduktionerne for solenergi mellem 2001-2012 skyldtes den markedsstimulerende politik, som Tyskland blandt andre førte.⁴³ Det skete blandt andet gennem produktionsstøtte og krav til elforsyningsselskaber om at købe vedvarende energi. Det tyske nichemarked for solenergi dannede dermed udgangspunkt for den efterfølgende omkostningsreduktion på 83 pct. siden 2009 og er sidenhen af forskere blevet kaldt "Tysklands gave til verden".⁴⁴ En grøn omstilling, der er omkostningseffektiv over tid, kræver derfor en blanding af politiske virkemidler og internationale samarbejdsrelationer, der både kontinuerligt fremmer og tilpasses til udviklingen af nye teknologier.⁴⁵

Der er ingen specifikke mål på området for teknologiudvikling i klimaloven

Teknologiudvikling- og udbredelse er ikke omfattet af specifikke mål i klimaloven og dens bemærkninger. Området nævnes ikke direkte i klimaloven, men kan fortolkes som relevant for § 1, hvor det nævnes som et guidende princip, at *"Danmark skal være et foregangsland i den internationale klimaindsats, som kan inspirere og påvirke resten af verden"*. Mere specifikt, angives det i klimalovens bemærkninger, *"at aftaleparterne ønsker et styrket internationalt myndighedssamarbejde om klima med fokus på verdens store udledere af drivhusgasser og udviklingslande, og desuden et fokus på øget dansk eksport af energiteknologi"*.⁴⁶ Derudover står der i lovens bemærkninger, at den globale afrapportering skal indeholde *"reduktioner fra eksport af el fra vedvarende energikilder"* samt *"effekterne af de danske bilaterale energisamarbejder med store CO₂-udledere"*. I klimaloven er der altså primært fokus på at fremme eksport af energiteknologi og myndighedssamarbejde, og ikke de innovationsprocesser, som er forudsætningen for den grønne eksport.

I internationalt regi, har Danmark og de andre udviklede lande i Parisaftalen forpligtet sig til at opfylde Parisaftalens artikel 6 og artikel 10, som indeholder en forpligtelse om at bidrage til teknologiudvikling og teknologioverførsel til mindre velstående lande med henblik på at fremme bæredygtig udvikling i overensstemmelse med klimamålet i Parisaftalen.⁴⁷

Danmark har en eksisterende indsats for at fremme grøn teknologiudvikling og -udbredelse

Danmark har en eksisterende indsats på området både nationalt og i den langsigtede globale klimastrategi fra 2020.⁴⁸ På nationalt plan er der en politisk indsats for at fremme grøn forskning og innovation fordelt på de tre delområder 1) forskning, 2) udvikling og demonstration, samt 3) markedsmodning.⁴⁹ Indsatsen består blandt andet i finansiering af grøn forskning og udviklings- og demonstrationsprojekter, hvor der eksisterer en politisk aftale om at fastholde de øremærkede midler på minimum 2,4 mia. kr. (2023-priser) frem til 2025, svarende til lidt under 0,1 pct. af BNP i 2022. Aftalepartierne om fordeling af forskningsreserven har også forsøgt at give forskningen en mere grøn strategisk retning gennem fire grønne forskningsmissioner,⁵⁰ samt etableret støtteordninger til at tage mere klimavenlige teknologier i brug. I den globale strategi er der delvist fokus på teknologiudvikling, blandt andet inden for skibsfart, men der fokuseres hovedsageligt på grøn eksportfremme.

Der er sket en mere strategisk prioritering af grøn teknologiudvikling

Inden for forsknings- og innovationsområdet er der kommet større fokus på at give en grøn retning til de danske forsknings og udviklingsaktiviteter. Den forrige regerings grønne forskningsstrategi fra 2020 foreslog at oprette fire missioner med tilhørende partnerskaber uden direkte statslig deltagelse, som sidenhen er politisk vedtaget i forbindelse med fordelingen af forskningsreserven.⁵¹ Partnerskaberne finansieres blandt andet af bevillinger fra Innovationsfonden og består hovedsageligt af universiteter, virksomheder og godkendte teknologisk service-institutter (GTS), som blandt andet har udviklet såkaldte roadmaps for deres områder. Missionerne fokuserer på:

- 1) Grønne brændstoffer til transport og industri (power-to-X mv.).
- 2) Fangst og lagring eller anvendelse af CO₂.
- 3) Klima- og miljøvenligt landbrug og fødevarerproduktion.
- 4) Cirkulær økonomi med fokus på plastik og tekstiler.

I 2022 blev cirka 1,1 mia. kr. tildelt fra staten inden for missionen om landbrug og fødevarerproduktion, mens et tilsvarende beløb blev fordelt mellem de tre andre missioners områder med hovedvægt på missionen om grønne brændstoffer.⁵² 1,3 mia. af statens 7,8 mia. uddelte midler i årene 2021-2023 er tildelt via missionspartnerskaberne, mens andre projekter på samme område, som modtager offentlig støtte uden om partnerskaberne, også regnes med, når finansieringen af missionerne skal opgøres. Der er desuden i den grønne forskningsstrategi defineret syv temaområder, som delvist overlapper med de fire missioner. Temaområdet 'Bæredygtige energiteknologier og -produktion mv.' modtog med 1,3 mia. kr. flest midler blandt temaområderne i 2022.

I markedsmodningsstadiet er der desuden blevet oprettet otte erhvervsfyrtårne med en investering på 1 mia. kr. frem mod 2027, som både er lokalt forankret i forskellige landsdele og hvert fokuserer på et teknologisk område, blandt andet fangst og lagring eller anvendelse af CO₂ (Nordjylland), grøn energi og sektorkobling (Syddanmark), udvikling, test og demonstration af grøn energi (Bornholm), og bæredygtigt byggeri (Sjælland og Øerne). Der er nogle overlap mellem de grønne forskningsmissioner og de lokale erhvervsfyrtårne. Hertil kommer, at Danmarks Erhvervsfremmebestyrelse uddeler og indstiller til uddeling af cirka 3 mia. kr. fra EU frem mod 2027 via den politisk vedtagne investeringsstøtteordning og midlerne Danmark modtager fra EU's Regionalfond og EU's Socialfond Plus, som blandt andet skal gå til de førnævnte erhvervsfyrtårne. Inden for brint og power-to-X har Erhvervsstyrelsen desuden udvalgt to projekter til deltagelse i et såkaldt vigtigt projekt af fælleseuropæisk interesse (IPCEI) med et budget på 850 mio. kr.

Endelig er statens kommercielle investeringer gennem lån, egenkapital og garantistillelse blevet omorganiseret ved sammenlægningen af Vækstfonden, EKF Danmarks Eksportkredit og Danmarks Grønne Investeringsfond i Danmarks Eksport- og Investeringsfond (EIFO). I den forbindelse har staten indskudt 1,7 mia. kr. varigt til styrkelse af eksportindsatsen gennem kommercielle storskala demonstrationsprojekter af grøn karakter.

Der er dermed sket en strategisk opprioritering af det grønne på forsknings- og innovationsområdet, men Klimarådet har tidligere kommenteret, at området fremstår "komplekst og ukoordineret"⁵³ om end transparensen siden er øget med en kortlægning af bevillingerne til grøn forskning og innovation.⁵⁴

Strategier for omstilling af sektorer og den globale klimaindsats giver retning

Regeringens *Klimaprogram 2023* indeholder fem sektorkøreplaner, der skal anviser de næste skridt i omstillingen inden for de enkelte sektorer og de tekniske potentialer for reduktioner, samt fem køreplaner for realisering af udvalgte tekniske reduktionspotentialer i 2030, som kræver forskning og udvikling og delvist dækkes af særskilte strategier. I køreplanernes nuværende form på ca. 2-3 sider benyttes de primært til at informere om eksisterende og kommende politiske tiltag på de respektive områder. Køreplanerne er derfor vigtige for at give forudsigelighed for samfundskonteksten rundt om forsknings- og udviklingsaktiviteterne, men giver i mindre grad koordinerende vejledning for de ovennævnte offentlige og private aktører på området.

Regeringens årlige udmøntning af den langsigtede globale strategi, der udkommer som en del af regeringens klimaprogram, giver også en vis international retning for aktiviteter inden for teknologiudvikling og -udbredelse. Den nuværende og den forrige regering har begge prioriteret grøn eksportfremme og myndighedssamarbejde i sit diplomatiske arbejde, men der er også elementer med mere direkte fokus på teknologiudvikling. Udmøntningen af regeringens globale strategi i *Klimaprogram 2023* anfører, at Danmark på trods af sin lille størrelse kan have "betydelig indvirkning på globale udledninger" blandt andet "når danske teknologier, løsninger og ekspertise anvendes i udlandet".

Dette vedrører særligt to af strategiens fem hovedspor om at ”*reducere de globale drivhusgasudledninger ved at vise vejen for grøn omstilling*” og at ”*samarbejde med erhvervet om grønne løsninger, der gør en forskel*”.⁵⁵

Inden for det første spor, er der hovedsageligt fokus på diplomatisk arbejde blandt andet med henblik på at øge EU's og andre landes klimaambitioner, samt på myndighedssamarbejde inden for energi, fødevarer og vand og miljø. Inden for det erhvervsorienterede spor, prioriteres det at øge danske virksomheders grønne eksport og mindske deres negative aftryk på klima og biodiversitet. Blandt de sekundære prioriteter fremgår det danske lederskab af Zero-Emission Shipping Mission, som er et offentligt-privat partnerskab om dekarbonisering af skibsfarten, blandt andet sammen med Mærsk. Denne mission forsøger at ”*accelerere den grønne omstilling af skibsfarten gennem innovation og konkrete skalerbare pilotprojekter frem mod 2030 med henblik på at realisere målsætningen om klimaneutral international skibsfart i 2050*” og udgør dermed et primært innovations-orienteret element i den globale strategi. Det nævnes også, at man vil prioritere at ”*hjemtage viden, erfaringer og løsninger gennem Innovation Center Denmark og udvalgte myndighedssamarbejder*” blandt andet fra Indien, Sydkorea, USA og Sydafrika.

Som nævnt i afsnit 5.2 om klimanytten af grøn eksport i hovedanalysen om *Danmarks globale klimainsats*, er der dog en risiko for at klimanytten af eksport af modne teknologier overvurderes på grund af et tvivlsomt valg af referencegrundlag. Det kan derfor overvejes at skærpe fokus på at udvikle og fremme eksporten af mindre modne teknologier, som kan bidrage mere til udviklingen af attraktive løsninger i sektorer, som stadig befinder sig i fremkomstfasen eller komplementerende teknologier, der kan muliggøre en hurtigere omstilling af sektorerne i udbredelsesfasen (se figur 2).

Danmark kan få svært ved at fastholde foregangslandsrollen på teknologiområdet

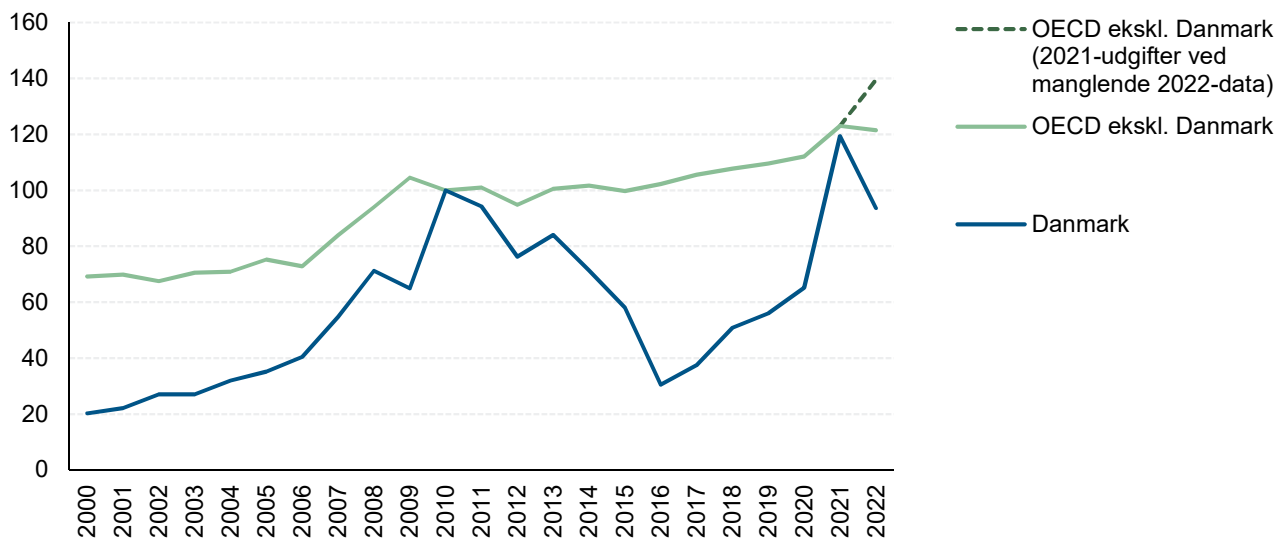
På trods af den historiske succes inden for vindenergi og energieffektive løsninger inden for blandt andet byggeri og fjernvarme, og den øgede strategiske satsning på grøn teknologiudvikling, er det uklart, om Danmark kan fastholde sin historiske rolle som foregangsland angående teknologiudvikling og -udbredelse inden for de næste generationer af grønne teknologier. Et lille land som Danmark kan selvsagt ikke være førende på størstedelen af de grønne teknologier, men flere forhold indikerer, at der kan være behov for yderligere handling for at kunne fastholde den historiske positionen som foregangsland.

Niveauet for offentlige investeringer i forskning og udvikling af energiteknologi er genoprettet, men udlandets investeringer har været mere stabile og er vokset mere

Den danske stat investerede i 2010 og 2011 over 1 mia. kr. i forskning og udvikling inden for energiteknologi, ifølge opgørelser fra OECD.⁵⁶ Frem til 2016, faldt Danmarks offentlige investeringer til 31 pct. af topniveauet i 2010 (i faste priser), hvorefter investeringsniveauet løbende blev genoprettet og i 2021 overgik det hidtidige topniveau, som vist i figur 5. I 2022 var investeringerne 6 pct. mindre end i 2010. I samme periode, fra 2010 til 2022, har de øvrige OECD-lande, foruden Danmark, haft mere stabile investeringer i forskning og udvikling inden for energiteknologi, og investeringerne er øget med 22 pct. Hvis 2021-investeringerne tilføjes for lande med manglende data for 2022, har væksten i de øvrige OECD-lande været på 39 pct. siden 2010. Danmarks investeringer i forskning og udvikling af energiteknologi har dermed været mere ustabile og er vokset mindre end i de øvrige OECD-lande, hvilket kan give anledning til overvejelser, dels om der er et efterslæb og om investeringsniveauet er højt nok.

Danmarks offentlige investeringer på dette område er gået fra i 2016 at være det femtende højeste investeringsniveau relativt til BNP i OECD til igen at være det femte højeste niveau i 2022, som det også var tilfældet i 2010-2011. Den generelt stigende tendens i andre OECD-lande betyder dog, at Danmarks investeringer nu udgør en mindre del af OECD's totale investeringer på området end ved toppen i 2010. De danske grønne forskningsmidler investeres dog i stigende grad også uden for energiområdet, blandt andet inden for landbrug og fødevarer, samtidig med at private fonde har øget investeringerne, hvorfor Danmarks samlede indsats potentielt står et bedre sted relativt til omverdenen end figur 5 tilsiger.⁵⁷

Indekserede udgifter:
100=2010



Figur 5 Offentlige udgifter til forskning og udvikling inden for energiteknologi

Anm. Udgifterne til forskning og udvikling af energiteknologi er indekseret relativt til udgifterne i 2010, som indtil 2021 var højdepunktet for Danmarks offentlige investeringer. Udgifterne er opgjort i faste priser (2015 dollars og PPP). Den stiplede mørkegrønne linje tilføjer udgiftsniveauet for 2021 for lande uden data for 2022, hvilket af størst betydning indbefatter Storbritannien, Sydkorea og Australien. Væksten i OECD-landenes udgifter kan være underestimeret, fordi Canada senest indgik i 2016 med 461 mio. dollars, svarende til 3 pct. af OECD-landenes udgifter i 2016 og med 5 pct. af udgifterne i 2010.

Kilde OECD Government budget allocations for R&D.⁵⁸

Danmark kan mangle koordination på området for grøn forskning, udvikling og demonstration

Selvom de seneste to regeringer har gjort en indsats for at øge den grønne strategiske retning i innovationssystemet, kan det dog fortsat være relevant at øge koordinationen på tværs af aktører og teknologiske modenhedsniveauer. Klimarådet,⁵⁹ Tænketanken DEA,⁶⁰ Det Forsknings- og Innovationspolitiske Råd,⁶¹ forskere⁶² og EU's eksterne gennemsyn af det danske innovationssystem⁶³ har rejst spørgsmål om, om innovationssystemet i bred forstand er tilstrækkeligt koordineret. Mangel på koordination mellem innovationssystemets ellers velfungerende aktører langs innovationskæden fra forskning til kommercialisering medfører større risiko for at teknologier fanges i en 'dødens dal', enten inden teknologien bliver demonstreret som funktionsdygtig eller inden teknologien tiltrækker nok finansiering til at investere i en opskalering af produktionen.⁶⁴ Det kan føre til forsinkelser eller stilstand på teknologiernes vej til at bidrage til omstillingen af samfundet.

Regeringens *Klimaprogram 2023* indeholder en hensigt om at fremsætte "et politisk udspil om grøn forskning og innovation, der har til formål at accelerere udviklingen af grønne løsninger og understøtte indfrielse af klimalovens mål". Dette udspil vil være en anledning til at belyse udfordringer og muligheder i organiseringen af det grønne innovationssystem. Regeringens ekspertgruppe om forskningens betydning for den grønne omstilling er i færd med at udarbejde en analytisk ramme, der kan bidrage til at vurdere, hvordan forskningsfinansiering til udvikling og modning af teknologier bedst kan føre til reduktioner på sigt.⁶⁵ Denne analytiske ramme vil også inddrage relevante rammebetingelser, fx om lovgivningen har en tilskyndende eller bremsende effekt. Analyserammen vil desuden blive afprøvet som analyseværktøj på de fire grønne forskningsmissioner, hvilket potentielt kan kaste yderligere lys over koordinationen på området for grøn innovation.

Fortsat behov for prioritering af den grønne teknologiudvikling og -udbredelse

Som opsummering, er der et generelt stort behov for tilskyndelse til handling på området for klimavenlig teknologiudvikling og -udbredelse på grund af en række barrierer med særlig stor virkning på det grønne område. De seneste to regeringer har prioriteret en større del af de offentlige forsknings- og innovationsmidler til strategiske satsninger på området, men der er stadig potentiale for at øge Danmarks positive globale aftryk gennem øgede investeringer samt en evaluering af organiseringen og koordinationen i det grønne innovationssystem. Begge disse tiltag kan blive styrket af bedre metoder til at monitorere udviklingen på området for grøn innovation.

2.3 Metoder til at monitorere

En vigtig forudsætning for at kunne sætte et konkret mål eller pejlemærke er, at der er veletablerede metoder og tilgængeligt data til at kunne monitorere indsatsen og udviklingen i samme. Metoderne kan være af forskellig modenhed og forbundet med forskellige usikkerheder, som man skal være opmærksom på i forbindelse med, om der sættes et eventuelt mål eller pejlemærke.

Det er vanskeligt at opgøre effekten af indsatser for udvikling og udbredelse af grøn teknologi

Selvom der er et stort globalt potentiale for reduktioner gennem teknologiudvikling og -udbredelse, er det vanskeligt at påvise effekten af indsatser inden for teknologiudvikling og -udbredelse, samt hvor stort et aftryk Danmark kan opnå gennem sine indsatser.⁶⁶ Det skyldes blandt andet at forskningsbaserede innovationsprocesser er fundamentalt usikre, kollektive og kumulative.⁶⁷

- **Usikre.** I forskningsstadiet er hovedformålet frembringelse af viden, hvor det er uvist, om den viden giver anledning til anvendelige løsninger med en klimanytte. Investeringer i forskningsbaseret innovation er grundlæggende usikkert, fordi det finansielle afkast ikke vides, når beslutninger om investering i udvikling af nye teknologier og deres vej til markedet skal træffes. Strategier er vigtige for at muliggøre handling i en kontekst af grundlæggende usikkerhed.
- **Kollektive.** Forskning og innovation er kollektive aktiviteter, fordi det kræver mange forskellige kompetencer og aktører som skal integreres organisatorisk og samarbejde på tværs af organisationer.
- **Kumulative.** Fremskridt inden for forskning og innovation er kumulative, fordi den kollektive læring om problemerne og mulighederne på et givet område skaber fundamentet for senere læring. Det kræver vedvarende finansiering for at opretholde kapaciteterne til at lære over lang tid.

Disse karaktertræk medfører, at innovation er en kompleks proces, hvor det er svært præcist at udpege, hvilke virkemidler og aktiviteter inden for forsknings- og innovationsområdet, som har været afgørende for at et gunstigt resultat er opnået eller ej. I mange tilfælde, vil modningen og udbredelsen også afhænge af de økonomiske, sociale og politiske vilkår i samfundet. Af samme årsag har Klimarådet i *Statusrapport 2023* anført, at regeringen i højere grad bør tænke de grønne forskningsmissioner sammen med implementering, herunder økonomiske incitament, planlægning og borgerinddragelse, der understøtter udbredelsen af nye teknologier.⁵⁴ De komplekse årsagssammenhænge inden for teknologiudvikling og -udbredelse betyder, at der ikke er robuste metoder til at monitorere reduktionseffekterne af indsatser på området. Regeringens ekspertgruppe om forskningens betydning for grøn omstilling vurderer ligeledes i sin første rapport, at ”*Det er utrolig vanskeligt at monitorere og effektvurdere grøn forsknings reduktion af drivhusgasudledninger*”.⁶⁸

Der kan med fordel udvikles og rapporteres flere indikatorer på området for grøn forskning og innovation

Selvom årsagerne til reduktionseffekterne er svære at identificere præcist, kan det alligevel være hensigtsmæssigt at forbedre monitoreringen af Danmarks grønne innovationssystem med henblik på at vurdere, om forsknings- og innovationsmidlerne bruges effektivt i forhold til formålet. Der er i dag primært input-monitorering af investeringerne i forskning, udvikling og demonstration, og markedsmodning, og output-monitorering af den grønne eksport og myndighedssamarbejdet. Det grønne innovationssystem, som er illustreret i figur 4, har flere mellemkommende processer mellem forskningsfinansiering og eksport og påvirkningskanaler til udlandet, som med fordel kan belyses bedre.

Klimarådet.

Regeringens ekspertgruppe kan potentielt bidrage til at fremhæve relevante indikatorer, som eksisterer eller bør udvikles. En øget monitorering kunne eksempelvis indeholde forbedrede opgørelser over internationale forskningssamarbejder, TRL-udvikling (*technology readiness level*) for projekter som modtager offentlig støtte, oversigter over demonstrationsprojekter med stort potentiale, grønne patenter og nicheeksport af teknologier i markedsmodningsstadiet. Det vil dog være en udfordring at opgøre de kvalitetsmæssige aspekter, hvorfor monitoreringen ved hjælp af kvantitative indikatorer ikke kan anvendes som eneste styringsredskab.

Det kan derfor overvejes, om en styrket monitorering med fordel kan indgå i det årlige klimaprogram og/eller den globale afrapportering, eller om der bør etableres en mere dybdegående grøn innovationspolitisk redegørelse med et fast interval. En bedre monitorering vil kunne informere beslutninger om, hvordan den strategiske indsats bør udformes over tid, samt potentielt bidrage til at det grønne innovationssystem opprioriteres politisk.

Samlet set, vurderer Klimarådet, at der ikke er robuste metoder til at monitorere reduktionseffekten af udvikling og udbredelse af klimavenlige teknologier. Det bør overvejes, om en øget anvendelse af indikatorer kan bidrage til bedre forståelse og styring af området, hvilket kan være hensigtsmæssigt i lyset af det store globale reduktionspotentiale.

2.4 Definition af langsigtet retning

Hvis man skal kunne regulere Danmarks globale klimaindsats eller dele heraf kan det være hensigtsmæssigt at kunne definere et langsigtet mål/pejlemærke, som indsatserne kan rette sig efter. Det langsigtede mål/pejlemærker kan så suppleres af delmål for at facilitere handling på kort sigt.

Klimaloven og Parisaftalen giver en overordnet langsigtet retning for teknologiudviklingen

Danmarks klimamål og Parisaftalen skaber en overordnet klarhed om den langsigtede retning, som udviklingen og udbredelsen af grøn teknologi skal bidrage til at opnå. Verden skal opnå nettonuludledninger og sidenhen formentlig have nettonegative udledninger for at overholde Parisaftalen. Det betyder, at alt hvad der rimeligvis kan omstilles teknologisk skal omstilles, samtidig med at der skal udvikles negative udledningsteknologier.

Adfærdsændringer vil mindske omfanget af den påkrævede teknologiske omstilling, men efterlade betydelige udledninger, som kræver teknologiske løsninger. Det er dog usikkert, hvilke specifikke teknologier som vil være mest fordelagtige at udvikle og udbrede for at nå klimamålene, hvorfor den langsigtede retning kun kan siges at være delvist klargjort. Usikkerheden om de specifikke løsninger i fremtiden kræver en forsknings- og innovationspolitik, der både er udforskende efter nye veje, fx inden for kunstige proteiner og energilagring over længere tid, samt tilpasningsdygtig til robuste teknologiske trends, fx i retning af mere direkte elektrificering af vejtransporten.

2.5 Klar definition af målet

Hvis et mål eller et pejlemærke skal skrives ind i en klimalov, så bør det ideelt set være klart og tydeligt, hvad målet omfatter. Derved skal det også være muligt at definere klart, hvad målet er, samt hvad der tæller og ikke tæller med i målet. De nuværende nationale reduktionsmål er fx klart defineret, og baseret på FN's territorialprincip. Der findes dog også mange eksempler på mål, som er nyttige, fx Parisaftalens mål, selv om de ikke er entydigt defineret. Men jo mere entydigt et mål eller pejlemærke kan defineres, jo mindre mulighed er der for forskellige fortolkninger.

Der kan ikke sættes et klart defineret mål for teknologiudvikling og -udbredelsens reduktioner

Det vurderes ikke muligt at definere et klart, enkeltstående mål for udvikling og udbredelse af grøn teknologi. Særligt den lave grad af målbarhed af de komplekse årsagssammenhænge, som nævnt i afsnit 1.3, taler imod at sætte kvantitative målsætninger på området. Den kommende analytiske ramme fra regeringens ekspertgruppe om forskningens betydning imødegår denne kompleksitet ved at inddrage kriterier uden for forsknings- og innovationsområdet, som kan have betydning for resultaterne af indsatserne. Alligevel vil det blive svært at opnå en tilstrækkelig klarhed om, hvilke CO₂-reduktioner de danske indsatser resulterer i, til at fastlægge klare mål for den danske globale påvirkning.

2.6 Grad af kontrol med udviklingen

Hvis der sættes et mål, er det vigtigt, at den danske regering og de danske myndigheder har en betydelig grad af kontrol over udviklingen på området og dermed har mulighed for at påvirke udviklingen og nærme sig målet.

Danmark har stor indflydelse på indsatsen inden for egne grænser, men lille indflydelse på mulighederne for udbredelse i udlandet

Danmark har en delvis kontrol over, hvordan tiltag for at fremme teknologiudvikling og -udbredelse kan påvirke de globale CO₂-udledninger. Selvom der grundlæggende er usikkerhed angående resultaterne af innovationsprocesser, har Danmark en høj grad af kontrol over, hvor meget der investeres i udviklingen af teknologier i Danmark, samt om der et tidligt hjemmemarked til at modne demonstrerede teknologier. Staten har også stor indflydelse på, hvordan indsatserne organiseres. Organiseringen vil typisk vil kræve velfungerende offentligt-privat samarbejde i det grønne innovationssystem, og Danmarks erfaringer inden for vindenergi viser, at det kan lade sig gøre. Danmark har dog en mindre grad af kontrol over, om ønskede internationale samarbejdspartnere finder danske aktører attraktive.

Selve udbredelsen af teknologierne afhænger i høj grad af omverdenens villighed og parathed til at øge anvendelsen af de teknologiske fremskridt, som fremkommer fra det danske innovationssystem. Den brede tilslutning til Parisaftalen og den tiltagende udbredelse af nationale netto-nul-målsætninger giver en delvis vished om, at funktionsdygtige og relativt økonomisk attraktive klimavenlige teknologier vil kunne finde efterspørgsel i udlandet. De øgede internationale investeringer i energiteknologi, som vist i figur 5, kan dog også forventes at medføre en hårdere international konkurrence om efterspørgslen. Det tiltagende internationale fokus på industripolitik kan desuden gøre de internationale markedsforhold mindre forudsigelige.

At Danmark kun delvist har kontrol over området taler imod at sætte overordnede kvantitative mål på området i klimaloven.

3 Diskussion af anbefaling til indhold i klimaloven

Klimarådets vurdering er opsummeret i tabel 2.

Tabel 2 Vurdering af teknologiudvikling og -udbredelse

Kriterium	Vurdering
Potentiale for CO ₂ e-reduktioner	Ukendt for Danmark, men potentielt meget stort
Behov for tilskyndelse til handling	Ja
Metoder til at monitorere	Nej
Definition af langsigtet retning	Delvis
Klar definition af målet	Nej
Grad af kontrol over udviklingen	Delvis

Det er ikke muligt at definere et samlet klart mål eller pejlemærke for teknologiudvikling- og udbredelse

Selvom der er en langsigtet retning for udviklingen og udbredelsen af klimavenlig teknologi, vurderer Klimarådet, at det ikke er hensigtsmæssigt at sætte et kvantitativt mål eller pejlemærke for områdets reduktionsbidrag. Det er særdeles vanskeligt at måle effekter af indsatser på innovationsområdet, da området er kendetegnet ved komplekse

årsagssammenhænge med mange faktorer og aktører, som påvirker resultaterne over lange tidsforløb. Hertil kommer, at der mangler data og robuste metoder til at observere sammenhængene mellem indsats og effekt.⁶⁹ Endelig er vellykket innovation ofte afhængig af ramme- og markedsvilkår, som ikke bestemmes direkte på innovationsområdet, hvorfor resultatet af indsatser kan være betinget af tværpolitisk koordination og internationalt samarbejde.⁷⁰ Derfor vurderer Klimarådet, at det ikke er hensigtsmæssigt at definere et klart mål eller pejlemærke for CO₂e-reduktioner på området.

For hvert kriterium i metoden for *Danmarks globale klimaindsats*, kan Klimarådets vurdering opsummeres som følger:

1. **Potentiale for CO₂e-reduktioner.** Der er globalt set et meget stort potentiale for at reducere udledningen af drivhusgasser gennem udvikling og udbredelse af klimavenlig teknologi. Potentialet for Danmarks bidrag er dog ukendt.
2. **Behov for tilskyndelse til handling.** Der er en række barrierer for udvikling og udbredelse af klimavenlige teknologier, som medfører et vedvarende behov for politisk handling og prioritering. De seneste to regeringer og aftalepartier i Folketinget har siden vedtagelsen af klimaloven opprioriteret indsatsen, men det er uklart om indsatsen er tilstrækkelig til at indfri Danmarks potentiale på området.
3. **Metoder til at monitorere.** Der er ikke robuste metoder til at estimere drivhusgasreduktioner som følge af danske indsatser på området for teknologiudvikling og -udbredelse. Det skyldes, at området er kendetegnet ved komplekse årsagssammenhænge med mange faktorer og aktører, som påvirker resultaterne over lange tidsforløb. Der er et potentiale for at anvende flere indikatorer til at monitorere området.
4. **Definition af langsigtet retning.** Parisaftalen og klimaloven giver overordnet set en langsigtet retning for udviklingen og udbredelsen af klimavenlig teknologi ved at definere de udfordringer, der skal løses. Det er dog uvist, hvilke teknologier, som vil blive mest attraktive at anvende, hvorfor den langsigtede retning kun er delvist defineret for aktører på området.
5. **Klar definition af målet.** Den lave grad af målbarhed på området og de komplekse årsagssammenhænge betyder, at det ikke er muligt at lave en klar måldefinition for drivhusgasreduktioner på området for teknologiudvikling og -udbredelse.
6. **Grad af kontrol over udviklingen.** Danmark har stor indflydelse på aktiviteterne inden for Danmarks grænser samt over afsætningsvilkårene på hjemmemarkedet. Danmark har imidlertid lav grad af indflydelse på omverdenens vilje til at lave forskningsamarbejde og importere teknologi fra danske aktører, hvorfor der kun kan siges at være delvis kontrol over udviklingen på området.

Der er fordele og ulemper ved en styrket indsats for at fremme teknologiudvikling og -udbredelse

Fordele og ulemper ved en styrket indsats for at fremme teknologiudvikling og -udbredelse er opsummeret i tabel 3.

Tabel 3 Fordele og ulemper ved indsats

Fordele	Ulemper
Det er en global indflydelseskanal, hvor Danmarks indsats potentielt kan bidrage til store globale reduktioner over tid.	Det er vanskeligt at dokumentere hvad offentligheden får ud af pengene som investeres. Der er desuden omkostninger forbundet med øget monitorering for staten og støttemodtagere.
Danmarks økonomiske værdiskabelse kan vokse over tid som følge af teknologiske og produktionsmæssige pionérfordele i nye markeder for klimavenlige produkter.	Det er vanskeligt at definere og opnå en optimal organisering af det grønne innovationsområde.

Fokus på teknologiudvikling og -udbredelse bør styrkes

Selvom det ikke er hensigtsmæssigt at styre området efter et kvantitativt mål eller pejlemærke for CO₂e-reduktioner, vurderer Klimarådet, at det alligevel er vigtigt, at regeringen løbende prioriterer indsatsen på området. Regeringens kommende udspil til en strategi for grøn innovation er en velkommen mulighed til at evaluere, diskutere og eventuelt ændre indsatsen for at fremme den grønne teknologiudvikling og -udbredelse. Som det gælder for alle de ti områder behandlet i denne analyse, er det vigtigt at få et mere struktureret fokus på teknologiudvikling og -udbredelse i den langsigtede globale strategi og den globale afrapportering med et bredere fokus end på den grønne eksport.

I den forbindelse er det relevant at undersøge mulighederne for at forbedre monitoreringen af området for grøn teknologiudvikling og -udbredelse. Ved at bruge flere indikatorer og mere formativ evaluering kan det bedre vurderes, om forskningsmidlerne bruges effektivt i forhold til formålet, samt om systemets aktører i fællesskab lykkes med at skabe teknologiske fremskridt. For indeværende rapporteres der mest på, hvor mange midler der tilføres området i regeringens klimaprogram. En øget monitorering kunne eksempelvis indeholde indikatorer for internationale forskningssamarbejder, TRL-udvikling (*technology readiness level*) for projekter som modtager offentlig støtte, demonstrationsprojekter med stort potentiale, grønne patenter og nicheeksport af teknologier i markedsmodningsstadiet. Det vil dog være en udfordring at opgøre de kvalitetsmæssige aspekter, hvorfor monitoreringen ved hjælp af indikatorer ikke kan anvendes som eneste styringsredskab.

Referencer

- ¹ Geels, F., Sovacool, B.K., Schwanen, T., Sorrell, S., *Sociotechnical transitions for deep decarbonization: Accelerating innovation is as important as climate policy*, 2017, *Science*, 357, 6357, 1242-1244. (<https://doi.org/10.1126/science.aao3760>).
- ² Grubb, M., McDowall, W., Drummond, P., *On order and complexity in innovations systems: Conceptual frameworks for policy mixes in sustainability transitions*, 2017, *Energy Research & Social Science*, 33, 21-34 (<https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.09.016>).
- ³ Way, R., Ives, M.C., Mealy, P., Farmer, J.D., *Empirically grounded technology forecasts and the energy transition*, 2022, *Joule* 6, 2057–2082 (<https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.009>).
- ⁴ Lamb, W.F., Mattioli, G., Levi, S. m.fl., *Discourses of climate delay*, 2020, *Global Sustainability* 3, 17, 1–5 (https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/7B11B722E3E3454BB6212378E32985A7/S2059479820000137a.pdf/discourses_of_climate_delay.pdf).
- ⁵ IEA, *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5°C Goal in Reach (2023 Update)*, 2023 (https://iea.blob.core.windows.net/assets/7c02e774-9d1b-4398-9313-840913e1b4e6/NetZeroRoadmap_AGlobalPathwaytoKeepthe1.5CGoalinReach-2023Update.pdf).
- ⁶ van Est, R., *The Success of Danish Wind Energy Innovation Policy: Combining Visionary Politics and Pragmatic Policymaking* i de la Porte, C. m.fl. (eds), *Successful Public Policy in the Nordic Countries: Cases, Lessons, Challenges*, 2022. Oxford Academic.
- ⁷ Sharpe, S., *Five Times Faster: Rethinking the Science, Economics, and Diplomacy of Climate Change*, 2023. Cambridge University Press (<https://doi.org/10.1017/9781009326506>); PwC, *Net Zero Economy Index 2023*, 2023. (<https://www.pwc.co.uk/services/sustainability-climate-change/insights/net-zero-economy-index.html>).
- ⁸ Our World in Data. *Kaya identity: drivers of CO₂ emissions, World* (<https://ourworldindata.org/grapher/kaya-identity-co2>).
- ⁹ Victor, D.G., Geels, F.W., Sharpe, S., *Accelerating the Low Carbon Transition: The Case for Stronger, More Targeted and Coordinated International Action*, 2019, The Energy Transitions Commission (<https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2019/12/Coordinatedactionreport.pdf>).
- ¹⁰ Stern, Nicholas, *A Time for Action on Climate Change and a Time for Change in Economics*, 2022, *The Economic Journal*, 132, 644, 2022, 1259–12 (<https://doi.org/10.1093/ej/ueac005>).
- ¹¹ Victor, D.G., Geels, F.W., Sharpe, S., *Accelerating the Low Carbon Transition: The Case for Stronger, More Targeted and Coordinated International Action*, 2019, The Energy Transitions Commission (<https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2019/12/Coordinatedactionreport.pdf>).
- ¹² Anderson, K, Buck, H.J., Fuhr, L., Geden, O., Peters, GP., Tamme, E., *Controversies of carbon dioxide removal*, 2023, *Nature Reviews Earth & Environment* (<https://doi.org/10.1038/s43017-023-00493-y>).
- ¹³ Malhotra, A., Schmidt, T., *Accelerating Low-Carbon Innovation*, 2020, *Joule*, 4, 11, 2259-2267 (<https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.09.004>).
- ¹⁴ Mathews, J.A. & Reinert, E., *Renewables, manufacturing and green growth: Energy strategies based on capturing increasing returns*, 2014. *Futures*, 61, 13-22 (<https://doi.org/10.1016/j.futures.2014.04.011>).
- ¹⁵ Lazard, *Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis—Version 16.0*, 2023 (<https://www.lazard.com/media/nltb551p/lazards-lcoeplus-april-2023.pdf>).
- ¹⁶ Way, R., Ives, M.C., Mealy, P., Farmer, J.D., *Empirically grounded technology forecasts and the energy transition*, 2022, *Joule* 6, 2057–2082 (<https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.009>).
- ¹⁷ Geels, F., Sovacool, B.K., Schwanen, T., Sorrell, S., *Sociotechnical transitions for deep decarbonization: Accelerating innovation is as important as climate policy*, 2017, *Science*, 357, 6357, 1242-1244.
- ¹⁸ DEA, *Arven fra vindmøllerne*, 2022 (<https://dea.nu/publikationer/arven-fra-vindmollerne>); Bloch, C., Ryan, T.K., Falkenberg, M., Baker, C., *The Danish wind energy sector's eco-system of research and testing facilities: Academic report from the Danish Centre for Studies in Research and Research Policy, Department of Political Science, Aarhus University*, 2022 (https://ufm.dk/forskning-og-innovation/rad-og-udvalg/danmarks-forsknings-og-innovationspolitiske-rad/projekter/klimamal-og-midler/dfir_baggrundsrapport_the_danish_wind_energy_sectors_ecosystem_of_research_and_testing_facilities.pdf).
- ¹⁹ van Est, R., *The Success of Danish Wind Energy Innovation Policy: Combining Visionary Politics and Pragmatic Policymaking* i de la Porte, C. m.fl. (eds), *Successful Public Policy in the Nordic Countries: Cases, Lessons, Challenges*, 2022. Oxford Academic.
- ²⁰ IRENA (2022). *Renewable Power Generation Costs in 2021*. International Renewable Energy Agency. Link: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>.
- ²¹ IRENA (2022). *Renewable Power Generation Costs in 2021*. International Renewable Energy Agency. Link: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>.
- ²² Our World in Data, *Wind power generation*, 2023 (https://ourworldindata.org/grapher/wind-generation?tab=chart&country=~OWID_WRL).
- ²³ DEA, *Arven fra vindmøllerne*, 2022 (<https://dea.nu/publikationer/arven-fra-vindmollerne>); Bloch, C., Ryan, T.K., Falkenberg, M., Baker, C., *The Danish wind energy sector's eco-system of research and testing*

- facilities: *Academic report from the Danish Centre for Studies in Research and Research Policy, Department of Political Science, Aarhus University*, 2022 (https://ufm.dk/forskning-og-innovation/rad-og-udvalg/danmarks-forsknings-og-innovationspolitiske-rad/projekter/klimamal-og-midler/dfir_baggrundsrapport_the_danish_wind_energy_sectors_ecosystem_of_research_and_testing_facilities.pdf)
- ²⁴ Deloitte og Kraka, *Small Great Nation Innovation - nøglen til bæredygtig vækst*, 2020 (https://kraka.dk/sites/default/files/public/small_great_nation_5_0.pdf);
- Nielsen, J., Englund, F., *Forskning, uddannelse og kredit kan øge den grønne innovation*, 2021, Arbejderbevægelsens Erhvervsråd (<https://www.ae.dk/analyse/2021-08-forskning-uddannelse-og-kredit-kan-oege-den-groenne-innovation>).
- ²⁵ Patent- og Varemærkestyrelsen, *Patenter i den grønne omstilling – tendenser i global udvikling af fremtidens teknologier*, 2021. .
- ²⁶ IEA, *Energy Technology Perspectives 2020*, 2020, side 90-91 (https://iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67dfob9ea/Energy_Technology_Perspectives_2020_PDF.pdf).
- ²⁷ Innovationsfonden, *Societal Readiness Levels (SRL) defined according to Innovation Fund Denmark*, 2019 (https://innovationsfonden.dk/sites/default/files/2019-03/societal_readiness_levels_-_srl.pdf)
- ²⁸ Klimarådet, *Kendte veje og nye spor til 70 procents reduktion*, 2020, side 9 (<https://klimaraadet.dk/da/rapport/kendte-veje-og-nye-spor-til-70-procents-reduktion>).
- ²⁹ Regeringen m.fl., *Klimaloven*, 2021 (<https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2021/2580>).
- ³⁰ IPCC, *Climate Change 2023 Synthesis Report, Summary for policymakers*, 2023, side 33. (https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf)
- ³¹ Grubb, M., Drummond, P., Poncia, A., McDowall, W., Popp, D., Samadi, S., Penasco, C., Gillingham, K.T., Smulders, S., Glachant, M., Hassall, G., Mizuno, E., Rubin, E.S., Dechezleprêtre, A., Pavan, G., *Induced innovation in energy technologies and systems: a review of evidence and potential implications for CO2 mitigation*, 2021, Environmental Research Letters, 16, 4 (<https://doi.org/10.1088/1748-9326/abde07>);
- Acemoglu, D., Aghion, P., Burszty, L., Hemous, D., *The Environment and Directed Technical Change*, 2012, The American Economic Review, 102, 1, 131-166 (<https://www.jstor.org/stable/41408771>);
- Mercure, J.F., *Complexity Economics for Environmental Governance*, 2022, Cambridge University Press (<https://doi.org/10.1017/9781108553650>).
- ³² Seto, K.C., Davis, S.J., Mitchell, R.B., Stokes, E.C., Unruh, G., Ürge-Vorsatz, D., *Carbon Lock-In: Types, Causes, and Policy Implications*, 2016, Annual Review of Environment and Resources, 41, 425-452 (<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085934>).
- ³³ Seto, K.C., Davis, S.J., Mitchell, R.B., Stokes, E.C., Unruh, G., Ürge-Vorsatz, D., *Carbon Lock-In: Types, Causes, and Policy Implications*, 2016, Annual Review of Environment and Resources, 41, 425-452 (<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085934>).
- ³⁴ Sharpe, S. & T. Lenton, *Upward-scaling tipping cascades to meet climate goals: plausible grounds for hope*, 2021, Climate Policy, 21:4, 421-433 (DOI: 10.1080/14693062.2020.1870097).
- ³⁵ OECD, *The design and implementation of mission-oriented innovation policies A new systemic policy approach to address societal challenges*, 2021 (https://www.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/the-design-and-implementation-of-mission-oriented-innovation-policies_3f6c76a4-en)
- ³⁶ Capasso, M., Hansen, T., Heiberg, J., Klitkou, K., Steen, M., *Green growth – A synthesis of scientific findings*. Technological Forecasting and Social Change, 2019, 146, 390-402 (<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.06.013>);
- Stern, Nicholas, *A Time for Action on Climate Change and a Time for Change in Economics*, 2022, The Economic Journal, 132, 644, 2022, 1259–12 (<https://doi.org/10.1093/ej/ueac005>);
- Blanchard, O., Gollier, C., Tirole, J., *The Portfolio of Economic Policies Needed to Fight Climate Change*, 2023, Annual Review of Economics, 15, 689-722 (<https://doi.org/10.1146/annurev-economics-051520-015113>).
- ³⁷ Stern, Nicholas, *A Time for Action on Climate Change and a Time for Change in Economics*, 2022, The Economic Journal, 132, 644, 2022, 1259–12 (<https://doi.org/10.1093/ej/ueac005>).
- ³⁸ Capasso, M., Hansen, T., Heiberg, J., Klitkou, K., Steen, M., *Green growth – A synthesis of scientific findings*. Technological Forecasting and Social Change, 2019, 146, 390-402 (<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.06.013>);
- ³⁹ Klimarådet, *Fremtidens grønne afgifter på energiområdet*, 2018 (<https://klimaraadet.dk/da/analyser/fremtidens-groenne-afgifter-paa-energiomraadet>)
- ⁴⁰ Jaffe, AB., Newell, RG., Stavins, RN., *A tale of two market failures: Technology and environmental policy*, 2005, Ecological Economics, 54, 2–3, 1, 2005, 164-174 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800905000303>);
- Blanchard, O., Gollier, C., Tirole, J., *The Portfolio of Economic Policies Needed to Fight Climate Change*, 2023, Annual Review of Economics, 15, 689-722 (<https://doi.org/10.1146/annurev-economics-051520-015113>).
- ⁴¹ Capasso, M., Hansen, T., Heiberg, J., Klitkou, K., Steen, M., *Green growth – A synthesis of scientific findings*. Technological Forecasting and Social Change, 2019, 146, 390-402 (<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.06.013>).
- ⁴² Patt, A., Lilliestam, J., *The Case against Carbon Prices*, Joule, 2, 12, 2018, 2494-2498 (<https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.11.018>).
- ⁴³ Kavlak, G., McNeerney, J., Trancik, JE., *Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules*, 2018, Energy Policy, 123, 2018, 700-710 (<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.015>).
- ⁴⁴ Nemet, G., *How Solar Energy Became Cheap: A Model for Low-Carbon Innovation*, 2019. Routledge. ISBN: 9780367136598 (<https://www.howsolargotcheap.com/germany>).

- ⁴⁵ Kern, F., m.fl., *Policy mixes for sustainability transitions: New approaches and insights through bridging innovation and policy studies*, 2019. Research Policy, 48, 10, 2019 (<https://doi.org/10.1016/j.respol.2019.103832>).
- ⁴⁶ Regeringen m.fl., *Klimaloven*, 2021 (<https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2021/2580>); Folketinget, *Forslag til Lov om klima*, 2020 (https://www.ft.dk/ripdf/samling/20191/lovforslag/1117/20191_1117_som_fremsat.pdf)
- ⁴⁷ UNFCCC, *Paris Agreement*, 2015 (https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_english_.pdf?gclid=EAIaIQobChMIs_E6NfAggMVVQmiAxontASXEAAAYASABEgI48PD_BwE).
- ⁴⁸ Regeringen, *En grøn og bæredygtig verden – regeringens langsigtede strategi for global klimaindsats*, 2020 (<https://www.regeringen.dk/nyheder/2020/en-groen-og-baeredygtig-verden-regeringens-langsigtede-strategi-for-global-klimaindsats>); Regeringen, *Klimaprogram 2023*, 2023 (<https://kefm.dk/Media/638315764817167867/Klimaprogram%202023.pdf>)
- ⁴⁹ Regeringen, *Klimaprogram 2023*, 2023 (<https://kefm.dk/Media/638315764817167867/Klimaprogram%202023.pdf>)
- ⁵⁰ Uddannelses- og Forskningsministeriet, *Regeringens forslag til missioner i 2021*, 2020 (<https://ufm.dk/publikationer/2020/fremtidens-gronne-losninger-strategi-for-investeringer-i-gron-forskning-teknologi-og-innovation/gron-forskningsstrategi/3-faktabilag-regeringens-forslag-til-missioner-i-2021.pdf>)
- ⁵¹ Regeringen, *Fremtidens grønne løsninger – Strategi for investeringer i grøn forskning, teknologi og innovation*, 2020 (<https://ufm.dk/publikationer/2020/fremtidens-gronne-losninger-strategi-for-investeringer-i-gron-forskning-teknologi-og-innovation/fremtidens-gronne-losninger-strategi-for-investeringer-i-gron-forskning-teknologi-og-innovation>).
- ⁵² Regeringen, *Klimaprogram 2023*, 2023 (<https://kefm.dk/Media/638315764817167867/Klimaprogram%202023.pdf>).
- ⁵³ Klimarådet, *Statusrapport 2022*, 2022, s. 127.
- ⁵⁴ Klimarådet, *Statusrapport 2023 - Baggrundsnotat: Sektorvurderinger*, 2023, side 37.
- ⁵⁵ Regeringen, *Klimaprogram 2023*, 2023 (<https://kefm.dk/Media/638315764817167867/Klimaprogram%202023.pdf>).
- ⁵⁶ OECD, Government budget allocations for R&D (under kategorien 'Energy'), 2023 (https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=GBARD_NABS2007). Bemærkning: Energiteknologi er et centralt område for verdens klimavenlige teknologiudvikling, om end kategorien også indeholder udgifter til fossil energiteknologi. I IEA's opgørelse af investeringer i forskning, udvikling og demonstration af energiteknologi kan man bortfiltrere investeringer i fossil energi, men der er indikationer på, at Danmarks investeringer i de seneste år undervurderes af IEA. Danmarks grønne forsknings- og udviklingsudgifter støtter desuden også andet end energiteknologi, blandt andet inden for landbrug, hvorfor statistikken ikke giver det samlede overblik.
- ⁵⁷ Regeringen, *Klimaprogram 2023*, 2023 (<https://kefm.dk/Media/638315764817167867/Klimaprogram%202023.pdf>).
- ⁵⁸ OECD, Government budget allocations for R&D (under kategorien 'Energy'), 2023 (https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=GBARD_NABS2007).
- ⁵⁹ Klimarådet, *Statusrapport 2022*, 2022, s. 127.
- ⁶⁰ DEA, *Arven fra vindmøllerne*, 2022 (<https://dea.nu/publikationer/arven-fra-vindmollerne>).
- ⁶¹ Danmarks Forsknings- og Innovationspolitiske Råd, *Klimamål og midler*, 2022 (https://ufm.dk/publikationer/2022/filer/dfir_hovedrapport_klimamaal_og_midler.pdf).
- ⁶² Voldsgaard, A., Mazzucato, M., Conway, R., *From Competition State to Green Entrepreneurial State: New challenges for Denmark*, 2022, Samfundsøkonomen, 2022, 2, Tema: Den Bæredygtige Stat (<https://tidsskrift.dk/samfundsokonomien/article/view/132832/177944>).
- ⁶³ Ketels, C., Hanouz, M.D., Hunter, J., Raven, T., *Peer Review of the Danish R&I System: Ten steps, and a leap forward: taking Danish innovation to the next level*, 2019, Directorate-General for Research and Innovation, European Commission (https://ec.europa.eu/research-and-innovation/sites/default/files/rio/report/PSF%2520Denmark_Final%2520report.pdf).
- ⁶⁴ Grubb, M., McDowall, W., Drummond, P., *On order and complexity in innovations systems: Conceptual frameworks for policy mixes in sustainability transitions*, 2017, Energy Research & Social Science, 33, 21-34 (<https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.09.016>).
- ⁶⁵ Ekspertgruppen om forskningens betydning for den grønne omstilling, *Rapport 1: Baggrunden for ekspertgruppen om forskningens betydning for den grønne omstilling*, 2023. Uddannelses- og Forskningsministeriet (<https://ufm.dk/publikationer/2023/rapport-1-baggrunden-for-ekspertgruppen-om-forskningens-betydning-for-den-gronne-omstilling>).
- ⁶⁶ Borrás, S., Laatsit, M., *Towards system oriented innovation policy evaluation? Evidence from EU28 member states*, 2019, Research Policy, 48, 1, 312-321 (<https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.08.020>).
- ⁶⁷ Lazonick, W., *The Theory Of Innovative Enterprise: foundations of economic analysis*, 2019, i The Oxford Handbook of the Corporation, Thomas Clarke (ed.), Justin O'Brien (ed.), Charles R. T. O'Kelley (ed.) (<https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198737063.013.12>); Borrás, S., Laatsit, M., *Towards system oriented innovation policy evaluation? Evidence from EU28 member states*, 2019, Research Policy, 48, 1, 312-321 (<https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.08.020>).
- ⁶⁸ Ekspertgruppen om forskningens betydning for den grønne omstilling, *Rapport 1: Baggrunden for ekspertgruppen om forskningens betydning for den grønne omstilling*, 2023. Uddannelses- og Forskningsministeriet

(<https://ufm.dk/publikationer/2023/rapport-1-baggrunden-for-ekspertgruppen-om-forskningens-betydning-for-den-gronne-omstilling>).

⁶⁹ Borrás, S., Laatsit, M., *Towards system oriented innovation policy evaluation? Evidence from EU28 member states*, 2019, *Research Policy*, 48, 1, 312-321 (<https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.08.020>).

⁷⁰ Grubb, M., McDowall, W., Drummond, P., *On order and complexity in innovations systems: Conceptual frameworks for policy mixes in sustainability transitions*, 2017, *Energy Research & Social Science*, 33, 21-34 (<https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.09.016>).

