

04.05.15

Virkemidler som kan fremme utvikling og bruk av miljøteknologi¹

Rolf Golombek², Mads Greaker³ og Snorre Kverndokk⁴

1. Innledning

Miljøinnovasjon kan være avgjørende for at miljøproblemer blir løst. Ett eksempel er Montreal protokollen, som regulerer globale utslipp av ozonnedbrytende stoffer, hvor utviklingen av teknologiske substitutter til KFK gasser var helt sentralt ifølge Barrett (1999). Miljøinnovasjon kan også gjøre det billigere å fjerne forurensende utslipp. Burtraw og Palmer (2003) fremhever innovasjon av nye renseteknologier som en av grunnene til at kostnadene ved å kutte SO₂ utslippene i USA ble vesentlig lavere enn forventet. Når det gjelder klimautfordringen, synes teknologiutvikling å være essensiell. I følge IPCC må verdens utslipp kuttes med mer enn 50 prosent innen 2050 og fjernes helt før 2100 for at målet om maksimalt 2° grader global temperaturstigning skal oppnås. Slike utslippsreduksjoner krever ifølge Hoffert et al. (2002) en «teknologisk revolusjon» av historiske dimensjoner.

Grønn skattekommisjon har bedt om en gjennomgang av nyere litteratur om offentlige virkemiddelbruk og forskning og utvikling av nye miljøteknologier. Det er opplagt at det er en nær knytning mellom miljøpolitikk og miljøinnovasjon. I rapporten bruker vi begrepet «miljøpolitikk» om all virkemiddelbruk som har til hensikt å begrense utslipp eller annen belastning på natur og miljø. Begrensinger av utslipp kan gjøres gjennom bruk av direkte virkemidler f.eks. ved å lovfeste maksimalt utslipp for den enkelte aktør, eller gjennom indirekte virkemidler f.eks. som en skatt på utslipp. I begge tilfeller kan man stille spørsmål om bruken av virkemidler dvs. miljøpolitikken er riktig dosert, med andre ord om den er tilstrekkelig streng til at de miljøpolitiske målene oppnås.

Miljøpolitikk gir incentiver til å utvikle ny miljøteknologi, men styrken på incentivene vil variere med hvilke virkemidler som brukes, doseringen av virkemidlet og hvilken type miljøteknologi vi snakker om. Ny miljøteknologi kan tenkes å forbedre miljøet på tre måter:

- Effektivisering i bruk av forurensende innsatsfaktorer
- Utvikling av rene substitutter til forurensende teknologier
- Teknologier som fjerner forurensing etter at den er oppstått

¹ Dette arbeidet er finansiert av Finansdepartementet.

² Frischsenteret og CREE.

³ Statistisk sentralbyrå og CREE.

⁴ Frischsenteret og CREE.

Effektivisering betyr at man bruker mindre av den forurensende innsatsfaktoren for det samme produksjonsvolumet⁵. Det er derfor en viss etterspørsel etter effektiviseringsteknologi uavhengig av miljøpolitikken siden effektivisering alltid vil være et gode for bedriftene og forbrukerne. Miljøpolitikk som skatt på fossile brensler, kan imidlertid gjøre noen innsatsfaktorer dyrere, og dermed føre til mer innovasjon innenfor effektivisering (se Popp, 2002, for en anvendelse på energieffektivisering).

Utvikling av rene substitutter kan også tenkes å skje uavhengig av miljøpolitikken. Det vil være etterspørsel etter slike innovasjoner så fremt kostnadene ved det rene substituttet er lavere enn det skitne alternativet. Men siden noen rene substitutter ikke er konkurransedyktige uten at miljøpolitikken gjør de skitne alternativene dyrere, synes denne type innovasjon å være mer avhengig av at bruken av virkemidlene er riktig dosert.

For teknologier som fjerner forurensing etter at den er oppstått (såkalt «end-of-pipe»-rensing), er miljøpolitikken helt essensiell. Uten miljøpolitikk vil det ikke være etterspørsel etter denne type teknologi siden den langt på vei vil være en ren tilleggskostnad for bedriftene.

Hvis det ikke fantes noen eksternaliteter ved teknologiutvikling, ville historien endt her: Så lenge myndighetene fører en riktig dosert miljøpolitikk, så vil også nødvendig teknologiutvikling skje. Men forskning over flere tiår har vist at det er en rekke ulike eksternaliteter eller markedssvikt ved innovasjonsprosessen som fører til at det skjer for lite innovasjon i markedet uten offentlige inngrep. Miljøpolitikken er ikke ment til å korrigere for dette. Dens rolle er å få forurenserne til å ta hensyn til den eksterne kostnaden de påfører andre. Som vi vil diskutere nedenfor, vil det derfor kreves andre virkemidler (enn for eksempel en pris på utslipp) for å oppnå et samfunnsøkonomisk riktig nivå på miljøinnovasjoner. Det vil likevel være slik at miljøpolitikken og innovasjonspolitikken påvirker hverandre.

I denne rapporten tar vi opp en rekke spørsmål knyttet til miljøinnovasjon:

- Hva driver utviklingen av ulike miljøteknologier? Miljøpolitikken er et opplagt svar, men også forutsetningene for å drive FoU blir drøftet; dette går vi nærmere inn på i kapittel 3.1.
- Hva er omfanget og karakteren av markedssvikt i utviklingen av miljøteknologier? Markedssvikt kan tenkes å oppstå flere steder i innovasjonsprosessen, noe som er tema for kapittel 3.1, 3.2 og 3.3.
- Er markedet for miljøteknologi vesentlig forskjellig fra markedene for annen type teknologi? Etterspørselen etter ny miljøteknologi vil avhenge både av hvor ambisiøs miljøpolitikken er og hvilken type politikkinstrumenter som velges i miljøpolitikken. Dette diskuterer vi i kapittel 4 og 5.

⁵ Det er ikke gitt at forurensingen går ned som følge av effektivisering, da det å produsere en gitt mengde blir billigere og produksjonsvolumet kan øke, se f.eks. Turner (2013) for en gjennomgang av «rebound»-effekten ved effektivisering.

- Hva anbefaler litteraturen om virkemidler rettet mot utvikling av miljøteknologier? Basert på diskusjonen i kapitlene 3 og 4 forsøker vi å komme frem til noen generelle anbefalinger i kapittel 5. Dette spørsmålet drøftes også spesifikt for Norge i kapittel 6. Kapittel 7 oppsummerer anbefalingene i kulepunkter.

Så lang som mulig vil vi forsøke å besvare spørsmålene ved å referere til forskningslitteratur om virkemidler for å fremme utvikling og bruk av miljøteknologi. I forbindelse med NoU 2009:16 foretok Bye et al. (2009) en slik gjennomgang. Vi tar derfor først og fremst opp ny litteratur som kom etter Bye et al. (2009). Vi vil også konsentrere oss om ett miljøproblem, klimaproblemet, da dette er den viktigste motivasjonen for utvikling av miljøteknologi. De fleste av konklusjonene våre vil likevel også gjelde for andre miljøproblemer. Forskning på innovasjon er både en egen fagretning innenfor økonomi og en egen disiplin i seg selv, og vi kommer med referanser til begge typer litteratur, selv om en overvekt av referansene er til samfunnsøkonomisk forskning da vi kjenner denne litteraturen best.

2. Innovasjon i en markedsøkonomi

I boken *The theory of economic development* (1934) beskriver Schumpeter innovasjonsprosessen. Innovasjon starter med at det genereres en ny idé. Idéen kan være et nytt produkt eller en ny prosess. Før idéen settes i produksjon må den imidlertid raffinere og prøves ut i liten skala. Dersom dette er vellykket, tas idéen til markedet. I starten vil gjerne produksjonskostnadene være større enn for tilsvarende etablerte produkter, og markedsintroduksjonen skjer derfor ofte i nisjemarkeder hvor betalingsvilligheten er høy. Etterhvert vil erfaring med produksjon og utforming av den nye idéen medføre at produksjonskostnadene faller. Den nye idéen kan dermed komme til å dominere markedet. I likhet med Schumpeter (1934) deler vi opp denne prosessen i tre faser:

- 1) «Forskning og utvikling» (FoU) betegner all aktivitet som skjer før en ny idé blir introdusert i markedet. Dette inkluderer alt fra laboratorieforskning til demonstrasjonsanlegg.
- 2) «Foredling» viser til de første årene til idéen i markedet. Da akkumuleres det erfaring som kan medføre større endringer i produksjonsmåter og utforming.
- 3) «Markedsetablering» er fasen der idéen finner sin endelige rolle. Den kan forbli et nisjeprodukt, et dominerende produkt i markedet, eller det kan vise seg at den ikke har livets rett.

Innovasjonsprosessen kan også sammenlignes med en filtreringsprosess: Man starter med mange idéer, men bare et utvalg av dem overlever overgangen til neste stadium. Særlig i de to første stadiene genereres det ny kunnskap, både om hva som virker og hva som ikke virker. Denne kunnskapen har karakter av å være et kollektivt gode i den forstand at alle som driver innovasjon nyter godt av kunnskapen uten at de forringer kunnskapen for andre, selv om de ikke selv har generert kunnskapen.

En rekke empiriske studier har vist samfunnsnyttene av FoU er vesentlig større enn den privatøkonomiske nytten.⁶ Myndighetenes rolle i en markedsøkonomi har derfor vært å fremme FoU på ulike måter. Deretter har de langt på vei overlatt til markedsaktørene å filtrere ut hvilke idéer som skal gå videre til foredlingsfasen ut fra at omfanget av markedssvikt er mindre dokumentert i denne fasen og i markedsetableringsfasen.⁷ Myndighetene har også vært opptatt av å sikre mest mulig nøytralitet mht. hvilke idéer de skal støtte med FoU-midler, da det er vanskelig å vite hvilke idéer som vil materialiseres som vellykkede produkter en gang i framtiden.

Oppdelingen i faser er ikke uproblematisk fordi det for mange teknologier stadig vil skje FoU selv om teknologien har nådd markedsetableringsfasen. Dette er etter vår mening et spørsmål om hvilket nivå man betrakter en teknologi på. Kullkraftteknologi nådde markedsetableringsfasen for flere år siden. Den er dominerende for kraftproduksjonsteknologi i verden, og fremskrittene med hensyn lavere kostnader og høyere effektivitet er nå små. Likevel vil det være elementer av kullkraftteknologi det stadig forskes på – eksempler er såkalt «kullgassifisering» og «superkritisk damp». Begge deler vil kunne øke effektiviteten i et kullkraftverk, og disse teknologiene befinner seg i en tidlig foredlingsfase. Alternativt kunne man slå fasene sammen og betrakte «fossil kraft» som et eget innovasjonssystem hvor enkelt komponenter befinner seg på ulike stadier til enhver tid (se innovasjonslitteraturen, f.eks. Lundvall, 1992). Vi mener likevel at en oppdeling i faser er hensiktsmessig ut fra en diskusjon av markedssvikt, og av hvilken fase myndighetene bør engasjere seg i.

3. Markedssvikt i innovasjonsprosessen

Nedenfor vil vi gi en oversikt over markedssvikt i innovasjonsprosessen. Gjennomgangen er generell og imperfeksjonene som gjennomgås kan gjelde både miljøinnovasjon og annen innovasjon.

3.1 Imperfeksjoner i FoU-fasen

For at det samfunnsøkonomisk riktige antall innovasjoner skal finne sted, bør den privatøkonomiske gevinsten sammenfalle med den samfunnsøkonomiske gevinsten. Det er mange typer av markedssvikt i FoU fasen som tilsier at dette ikke er tilfelle. For det første er det slik at når ideer først oppstår, er det mange som kan benytte seg av dem samtidig; ideer kan kopieres. Det vil ikke nødvendigvis være mulig å ekskludere noen fra å benytte seg av dem, og dermed vil bare deler av gevinsten ved å utvikle ideen tilfalle den som utvikler den. Manglende muligheter for å ekskludere noen fra å bruke ideen er derfor en slik markedsimperfeksjon. En annen imperfeksjon som trekker i samme retning er at innovatører kan bygge på tidligere kunnskap. Dette blir omtalt som «*standing on shoulders*» i litteraturen, se f.eks. Romer (1990),

⁶ Se for eksempel Nordhaus (2002), Popp (2004, 2006) og Gerlagh and Lise (2005) som antar at den samfunnsøkonomiske gevinsten av klimainnovasjoner er fire ganger størrelsen av den private gevinsten.

⁷ Innenfor miljøteknologier har myndigheten muligens hatt en sterkere påvirkning enn for andre teknologier. Et eksempel på dette er den store satsingen i Norge på karbonfangst og lagring (CCS).

og henspiller på at forskningen stadig kan bygge på en større kunnskapsbase. «*Standing on shoulders*» er en positiv eksternalitet: Dagens FoU øker produktiviteten til framtidens FoU, men de som gjør FoU i dag har ingen incentiver til å ta hensyn til dette. Dette betyr igjen at den samfunnsøkonomiske gevinsten av FoU kan være større enn den privatøkonomiske.

Som en motsats til «*standing on shoulders*» har vi «*fishing out*». Denne effekten henspiller på at kan være vanskeligere å komme på gode ideer hvis mange allerede har jobbet på samme feltet, f.eks. fordi det kan være et begrenset antall gode ideer på et område. Med «*fishing out*» vil det vil være en negativ eksternalitet fra innovasjoner i dag til innovasjoner i fremtiden, noe som betyr at det kan skje for mye forskning i dag. Dette er også en potensiell følge av «*creative destruction*». Begrepet er knyttet til Schumpeter (1934) og Aghion og Howitt (1992), og avspeiler at nye teknologier erstatter gamle. De nye teknologiene er bedre, og gjør de gamle innovasjonene verdiløse, og det vil derfor være en omfordeling av gevinsten ved innovasjon fra gamle til nye aktører. Dette kan føre til at den privatøkonomiske gevinsten av FoU kan bli høyere enn den samfunnsøkonomiske. Til slutt, har vi «*stepping-on-toes*» effekten (Jones and Williams, 2000). Effekten oppstår gjennom at mange forsker på samme idé i håp om å være den første som lykkes for dermed å få patent. Slike patent-race kan føre til økt duplisering - mange finner opp mer eller mindre det samme - noe som reduserer den samfunnsøkonomiske gjennomsnittsverdien av innovasjonen.

Selv om vi her har nevnt flere mulige negative eksternaliteter i kunnskapsproduksjon, synes konsensus i dag å være at «*standing on shoulders*» effekten dominerer slik at FoU nivået blir for lavt uten statlig engasjement. Det gjelder både miljøinnovasjon og annen innovasjon. Et helt annet forhold som kan gi for lite FoU er usikkerhet. Siden innovasjoner gir en usikker avkastning, vil den enkelte aktørs *holdning til risiko* ha betydning for innovasjonsinnsatsen. Bedrifter kan ha en kortere planleggingshorisont og opptre risikoavert i markedet, mens det offentlige kan ha risikonøytrale preferanser. Mazzucato (2013) er opptatt av at privat sektor i mange tilfeller ikke vil være villig til å engasjere seg i innovasjonsprosesser hvor usikkerheten er stor og mangefasettert. Hun nevner utviklingen av grønne teknologier som et eksempel hvor det både er tradisjonell risiko og politisk risiko, dvs. usikkerhet om fremtidig klima- og energipolitikk.

3.2 Imperfeksjoner i foredlingsfasen

Den samfunnsøkonomiske litteraturen om foredlingsfasen er langt på vei begrenset til studier av hvordan læring påvirker bedrifter. Utgangspunktet er at bedriften har et produkt og gjennom ulike typer aktiviteter vil produksjonsprosessen bedres: Økt produksjon i dag vil redusere fremtidige kostnader. Ofte er læringsprosessen formalisert ved læringskurver: Fremtidige produksjonskostnader avhenger av akkumulert produksjon, og fallet i kostnader er størst i starten av produktets levetid. Læringseffekter («*learning-by-doing*») vil være en eksternalitet hvis en bedrifts erfaringer også kommer andre bedrifter til gode. Gustavsson, Hansson og Lundberg (1999) finner for eksempel at spillovereffekter av læring eksisterer både på industrinivå, på tvers av sektorer og til en viss grad globalt.

Modeller med læringskurver har en lang tradisjon; et av de første empiriske arbeidene studerte telegrafoperatører på slutten av 1800-tallet, se Bryan og Harter (1899), mens Arrow (1961) var et av de første teoretiske studiene innen feltet. På 1980-tallet ble de næringsøkonomiske implikasjonene av læring studert. Spence (1981) viste at et monopol vil ta hensyn til egen læringskurve, og vil initialt prise lavere enn marginalkostnaden for å bevege seg nedover læringskurven raskere. Spence viser videre at denne effekten vil avhenge av markedsstrukturen, og at i situasjoner med høy grad av kunnskapsoverføring mellom bedrifter, vil bedriftene ikke prise like aggressivt. Fra et samfunnsøkonomisk synspunkt kan dette gi for lav markedsdiffusjon av det nye produktet.⁸

Dasgupta og Stiglitz (1988) argumenterer på sin side for at flere av konklusjonene i Spence (1981) er villedende når det gjelder likevekten med mange bedrifter. Dasgupta og Stiglitz (1988) antar at én bedrift har en initial kostnadsfordel. De viser at hvis denne kostnadsfordelen er tilstrekkelig stor og bedriften diskonterer fremtiden med en tilstrekkelig høy faktor, vil konsentrasjonen i industrien øke. Faktisk kan bedriften med den initiale kostnadsfordelen ende som monopolist. Dette gjelder bare dersom det ikke er stor grad av kunnskapsdeling mellom bedrifter.

3.3 Imperfeksjoner i markedsspredningsfasen

Innenfor disiplinen «næringsøkonomi» har man vært opptatt av i hvilken grad nye produkter som potensielt kan øke velferden likevel kan bli utestengt fra markedet. En grunn til at dette kan skje er nettverkseffekter. Nettverkseffekter betyr at en persons eller bedrifts kjøp av en vare øker nytten andre personer eller bedrifter har av varen, og sannsynlighetene for at flere vil kjøpe varen avhenger dermed av hvor mange som allerede har kjøpt varen.

Farrell og Saloner (1986) finner at overlegne produkter kan bli utestengt, eller få for liten distribusjon i markedet, dersom det er nettverkseffekter. Det skjer dersom det inferiøre produktet har en installert base av kunder. Det inferiøre produktet nyter godt av nettverkseffektene, og det er vanskelig å få til en koordinert overgang til det overlegne produktet. Katz og Shapiro (1986) introduser eierskap til den overlegne teknologien. Da trenger man ikke lenger å få teknologisk innlåsing («*lock-in*») i det inferiøre produktet: Eierne av det overlegne produktet vil kunne høste deler av den samfunnsøkonomiske gevinsten av en overgang til sitt produkt. Dermed har hun et insentiv til å selge det nye produktet med tap i en introduksjonsfase for å bygge opp kundebasen.

Læringskurver kan også gi teknologisk innlåsing dersom det er stor grad av kunnskapsdeling mellom bedriftene. Da vil den teknologien som tilfeldigvis velges først også kunne bli den foretrukne teknologien, selv om noen av de ikke-foretrukne teknologiene på lang sikt kan ha et større potensial. Arthur (1989) bruker atomkraft som eksempel. Etter andre verdenskrig ble det i USA prioritert å lage reaktorer som passet i ubåter, noe som muliggjorde både høy fart og lang

⁸ Fudenberg og Tirole (1983) finner mange av de samme resultatene som Spence (1981), men i en mer generell setting.

tid i neddykket tilstand. De plass- og vektbegrensningene dette medførte gjorde at en spesiell reaktortype ble valgt. Senere, da bruk av reaktorer til elektrisitetsproduksjon på land ble aktuelt, var det fristende å "forstørre" reaktorene som allerede var utprøvd i ubåter. Men i følge Arthur (1989) er det mye som taler for at andre reaktortyper på litt lenger sikt hadde egnet seg langt bedre til denne type produksjon. Læringen som var oppnådd med ubåtrektorer medførte imidlertid at denne reaktortechnologien ble valgt av private kraftprodusenter. De forholdt seg til den tids kostnader og ikke tok innover seg fremtidige samfunnsøkonomiske gevinster av at en alternativ type reaktor ble utviklet.

4. Virkemidler for innovasjon

4.1 Eiendomsrett

Mange økonomiske historikere hevder at korrigeringer av markedsimperfeksjonene ved innovasjoner gjennom *institusjoner* som sikret eiendomsrettigheter til innovasjoner, var den viktigste drivkraften bak den industrielle revolusjon og dermed den økonomiske veksten verden har hatt de to siste hundre årene (Jones, 2002). Eksempler på slike institusjoner er patentsystemet, kopirettigheter og innovasjonspriser.

Et *patent* er et juridisk dokument som beskriver en innovasjon og som sikrer patenteieren et monopol på bruken av innovasjonen over et antall år, vanligvis 20 år. Patenter skaper imidlertid et monopol, noe som gjør at det produseres for lite av godet i forhold til det samfunnsøkonomisk optimale (for et eksempel fra miljøteknologi, se Perino, 2010). I noen tilfeller kan begrensningen i salget ha store samfunnsøkonomiske kostnader (Boldrin og Levine, 2009, bruker f.eks. Aids-medisin som eksempel). Et patent korrigerer dermed en markedsimperfeksjon - manglende eiendomsrettigheter, men skaper en annen, nemlig markedsrett gjennom monopol. Den optimale patentlengden vil dermed være en avveining mellom to imperfeksjoner, og det vil derfor ikke være ønskelig med uendelig levetid på patenter (Iwaisako and Futagami, 2003).

Et annet problem er at patentet i seg selv kan hemme videre innovasjon. For det første kan patentet brukes til å hindre andre nye idéer å vokse fram, se f.eks. Boldrin og Levin (2009). For det andre vil monopoler kunne ha mindre incentiv til å drive innovasjon enn frikonkurransedrift. Allerede Arrow (1962) viste at en beskyttet monopolist har et mindre incentiv til innovasjon enn en frikonkurranseprodusent, gitt den samme etterspørselen. Denne konklusjonen har imidlertid blitt utfordret av Chen og Schwartz (2013) som viser at under visse betingelser kan konklusjonen være den motsatte.

4.2 Innovasjonspriser, statlige FoU investeringer og FoU subsidier

Et alternativ til patenter er *innovasjonspriser*. Da utlyses en stor pris (pengesum) til den som har den beste idéen eller innovasjonen innen et visst område. I stedet for å gi innovatøren et monopol, vil vedkommende få en stor engangsutbetaling. Dette virkemiddelet skaper dermed ikke markedsrett og gir derfor ikke samme problemene som patenter. I tillegg er usikkerheten rundt

den privatøkonomiske verdien av innovasjonen borte; innovatøren vet ikke hvor mye hun vil tjene på patentet. Et historisk eksempel er navigasjon til sjøs (se Jones, 2002). Den største utfordringen for utviklingen av shipping og internasjonal handel var lenge å bestemme skipets lokalisering på åpent hav. Breddegraden (nord-sør dimensjonen) var forholdsvis enkel å fastslå ved å se på vinkelen til Nordstjernen over horisonten. Lengdegraden, dvs. øst-vest-dimensjonen, var vanskelig. Dette var grunnen til at Columbus trodde han var kommet til India da han kom til Amerika; han klarte ikke å fastslå hvor langt vest han hadde seilt. På 1700-tallet utlyste herskerne i Spania, Nederland og England store pengesummer til den som kunne løse problemet. Dette førte til at navigasjonsproblemet til slutt ble løst av en engelsk klokkemaker, John Harrison. Han oppfant kronometeret, en mekanisk klokke, på midten av 1700-tallet som både kunne måle lengde- og breddegrader.

Innovasjonspriser kan også brukes i kombinasjon med patenter. Hvis det for eksempel er store forskjeller i privatøkonomisk og samfunnsøkonomisk gevinst ved noen typer innovasjoner, kan innovasjonspriser brukes for å korrigere denne forskjellen. Både Newell og Wilson (2005) og Brennan, Macauley og Whitefoot (2012) tar til orde for å bruke innovasjonspriser for å fremme miljøinnovasjoner. Deres utgangspunkt er at markedsusikkerheten er høyere for miljøinnovasjon og at en garantert premie vil kunne bøte på dette. Innovasjonspriser fordrer imidlertid at myndighetene kan definere vinnerkriterier og kjenner den samfunnsøkonomiske gevinsten av den ønskede innovasjonen slik at de kan sette den riktige størrelsen på innovasjonsprisen. Når det gjelder klimaproblemet, synes forutsetningene å være til stede for at myndighetene i mange tilfeller kan lykkes i dette: Noen teknologier som utslippsfri transport og karbonfangst peker seg ut som sentrale, og verdien av slike teknologier kan anslås vha. numeriske modeller (se f.eks. Baker et al, 2015).

FoU-subsidier er kanskje det viktigste virkemidlet for å korrigere «standing on shoulders» eksternaliteten i FoU. FoU-subsidier kan ta form av å opprette offentlige forskningsinstitusjoner (f.eks. universiteter) eller ved å støtte private forskningsinitiativ gjennom Norges Forskningsråd eller Innovasjon Norge. I Norge har vi også en helt generell støtteordningen til FoU; Skattefunn. Ordningen gir redusert bedriftsbeskatning på bakgrunn av dokumenterte FoU-kostnader. Skattefunn er nøytralt, dvs. alle typer FoU støttes. Derimot har både Innovasjon Norge og Forskningsrådet temarettede programmer som prioriterer visse type forskning som miljøinnovasjoner og petroleumsforskning.

4.3 Virkemidler rettet mot foredling og spredningen av nye miljøinnovasjoner

Som diskutert innledningsvis vil miljøpolitikken være det viktigste virkemidlet for spredning av ny miljøteknologi. I en survey artikkel fra 2003 refererer Jaffe, Newell and Stavins (2003) til en rekke empiriske arbeider som har vist at miljøpolitikken både gir økt innovasjon og diffusjon av ny miljøteknologi. Arbeidene indikerer også at markedsbaserte virkemidler er mer effektive i så måte enn direkte reguleringer (se side 504 i Jaffe, Newell and Stavins, 2003).

Som diskutert kan lærings- og nettverkseffekter utgjøre et argument for å supplere med flere virkemidler for å øke spredningen av nye miljøteknologier. Både i Norge og i EU finnes det et forholdsvis stort utvalg av slike teknologispesifikke virkemidler. Eksempler fra Norge på disse er *standarder og påbud* (f.eks. isolasjon av bygninger), *grønne sertifikater* og *innblandingspåbud for biodrivstoff*, mens flere EU land også bruker såkalte «*feed-in tariffs*» dvs. garanterte minimumspriser på elektrisitet fra nye, umodne produksjonsteknologier som solceller.

Slike virkemidler kan innføres for å få mer læring og raskere fallende kostnader. Videre vil det bli mer lønnsomt å drive FoU siden hver forbedring vil ha et større marked. Imidlertid synes det klart at myndighetene har hatt flere målsetninger enn å påvirke læring bla. forsyningsikkerhet. Derfor kan man stille spørsmålstegn ved om disse virkemidlene faktisk har bidratt til teknologiutvikling. Når det gjelder innføringen av grønne sertifikater i Norge, ser det ut til at støtten hittil i stor grad gått til prosjekter som benytter kjent vann- og vindkraftteknologi. Videre har innblandingspåbudet for biodrivstoff har først og fremst gitt mer første generasjons biodrivstoff, og liten eller ingen ny produksjon av andre generasjons biodrivstoff hvor teknologiutviklingspotensialet ser ut til å ligge (Eggert og Greaker, 2014). Johnstone, Hascic og Popp (2010) studerer sammenhengen mellom innovasjon og fornybarpolitikk nærmere. De finner at for å påvirke mer umodne teknologier som solkraft, så må virkemidlet være mer differensiert enn grønne sertifikater. Grønne sertifikater ser ut til først og fremst å påvirke innovasjoner i teknologier som nesten er konkurransekraftige i dag, mens f.eks. feed-in tariffen hvor minimumsprisen skiller seg fra teknologi til teknologi, gir innovasjon i mer umodne teknologier.

Det finnes også statelige foretak som utvikler ulike programmer for *investeringssøtte* for å øke bruken av teknologier. Slike programmer gjør det billigere å investere i den nye ferdigutviklede teknologien, og vil dermed føre til mer spredning. Ett eksempel er ENOVA som gir støtte til introduksjon av ny energi- og klimateknologi i industrien. Et annet eksempel er Gassnova som gir økonomisk støtte til utvikling, demonstrasjon og pilotprosjekter av CO₂-håndteringsteknologier gjennom CLIMIT-programmet. Gassnova forvalter også statens interesser i Teknologisenteret på Mongstad. Statens eierskap i dette senteret kan ses på som en form for risikoavlastning. Et mulig problem med slike statlige foretak som skal drive teknologiutvikling er at det satses for lenge og for mye på teknologier som viser seg å være blindveier. Flere eksempler fra USA på slike feilsatsinger finnes i Cohen og Noll (1991), og omfatter blant annet etablering av produksjon av kullbaserte flytende drivstoff i USA. Her og andre steder klarte ikke myndighetene å trekke seg ut på tross av at forventet teknologiutvikling ikke ble innfridd.

Manglende utbredelse på grunn av nettverkseffekter kan også motvirkes ved hjelp av ulike virkemidler. Disse virkemidlene kan ta form av støtte til en direkte utbygging av nettverk, for eksempel ladestasjoner til el-biler, indirekte støtte til nettverket ved å øke etterspørselen etter produktet (for eksempel subsidier til el-biler), eller andre etterspørselsstimulerende tiltak som skaper etterspørsel etter nettverket (forbud eller restriksjoner mot bensin/dieslbiler og høyere beskatning av slike biler).

5. Nyere litteratur om miljøinnovasjon

Nedenfor vil vi gå gjennom det vi oppfatter som viktige bidrag til litteraturen om miljøinnovasjon de siste årene. Siden vi har å gjøre med både en negative miljøeksternalitet og flere mulige positive eksternaliter på samme tid, er det mulig at miljøinnovasjon og annen innovasjon bør behandles ulikt av myndighetene. En forskjell er at den privatøkonomiske verdien av en miljøinnovasjon vil avhenge av framtidig miljøpolitikk. En annen forskjell som det har blitt fokusert på de siste årene, er at forskning på skitne teknologier og deres rene substitutter kan bygge på ulike kunnskapsbaser.⁹ Dette vil ha betydning for politikk for å fremme miljøinnovasjon.

5.1 Tidsinkonsistens – betydningen av en usikker miljøpolitikk

Som nevnt kan usikkerhet om framtidig klima- og energipolitikk påvirke FoU negativt. Problemet kompliseres ytterligere ved at vurderingene av riktig dosering av miljøpolitikken kan endres over tid; det som fortoner seg i periode t som riktig dosert miljøpolitikk for tidsperiode $t+1$ kan være enn annen dose miljøpolitikk enn det som fortoner seg som riktig når tidsperiode $t+1$ inntreffer, selv om ingen ytre omstendigheter er endret. Miljøpolitikken kan med andre ord være tidsinkonsistent, og dette kan redusere incentivene til å drive miljøinnovasjon.

Laffont og Tirole (1996) var blant de første til å studere betydningen av tidsinkonsistens for miljøinnovasjon. I deres modell investerer en privat aktør i FoU for å utvikle en ny renseteknologi. Dersom vedkommende lykkes, kan hun tilby renseteknologien til en forurensende sektor og tjene monopolprofitt på sitt patent. Myndighetene kan imidlertid påvirke hvor mye innovatøren tjener gjennom hvordan de regulerer de forurensende bedriftene. Laffont og Tirole (1996) viser at i deres tilfelle vil myndighetene ønske å ekspropriere hele monopolprofitten ved å sette en svært lav utslippsskatt. Den svært lave utslippsskatten fører til at innovatøren må sette en tilsvarende lav pris på sin nye teknologi for å få solgt teknologien. Det betyr igjen at teknologien får bred distribusjon, men også at incentivet til å investere i miljø-FoU nesten forsvinner.

Legg merke til at den svært lave utslippsskatten er optimal for myndighetene når innovasjonen foreligger. Hadde derimot skatten blitt satt før innovasjonen forelå, og myndighetene hadde tatt inn over seg at den fremtidige skatten påvirket incentivene til innovatøren, hadde den optimale skatten vært satt høyere. Myndighetene kunne ha løst problemet med tidsinkonsistens ved å forplikte seg til en regel for hvordan de setter utslippsskatten. Problemet er at innovasjon er en tidkrevende prosess, og at det kan være vanskelig å forplikte seg langt frem i tid. Dersom innovatøren lykkes, og politikerne kan ombestemme seg uten kostnader, ville de når innovasjonen foreligger likevel innføre den lave skatten. Og dersom innovatøren forutser dette, ja da er incentivene til å investere i miljøinnovasjon for små.

⁹ Dette er selvsagt en forenkling. Det er få teknologier som enten er det ene eller det andre, for eksempel vil mange rene teknologier som f.eks. vindmøller kunne ha negative miljømessige konsekvenser. En slik inndeling vil likevel kunne gi ny innsikt.

Modellen til Laffont og Tirole er på mange måter spesiell, og senere bidrag er mer tvilende til om problemet med tidsinkonsistent miljøpolitikk utgjør et stort problem for miljøinnovasjon. Requate (2005) studerer en mer generell modell for miljøinnovasjon. Han finner at først-best løsningen er å forplikte seg til en regel for miljøpolitikken. Men selv om dette ikke er mulig, kan en ikke konkludere at miljøpolitikk som er fastsatt etter at innovasjonen foreligger gir for lite innovasjon. Greaker og Hoel (2011) sammenligner incentivene for miljøinnovasjon med incentivene for generell innovasjon (innovasjon hvor myndighetene ikke griper inn i markedet etter at innovasjonen lanseres). De finner heller ikke noe entydig resultat som tilsier at den privatøkonomiske gevinsten ved miljøinnovasjon er systematisk lavere enn for generell innovasjon.

Laffont og Tirole (1996) forutsetter dessuten at myndighetene kan fininnstille miljøpolitikken fra sektor til sektor. For et sektorovergripende miljøproblem som klimaproblemet, kan det være mindre realistisk. På den annen side står ulike sektorer ovenfor ulik klimapolitikk i dag.

Golombek, Greaker og Hoel (2010) ser også på tidsinkonsistensproblemet. For det første finner de at problemet forsvinner dersom myndighetene kan subsidiere miljøinnovasjon i tilstrekkelig grad, noe som også vil gjelde i modellen til Laffont og Tirole (1996). Golombek, Greaker og Hoel (2010) viser også at den nest-beste politikken, dvs. optimal politikk når det ikke er mulig å subsidiere FoU i tilstrekkelig grad, er at myndighetene «lover» en fremtidig høy utslippsskatt. Men så lenge myndighetene ikke kan binde seg til den fremtidige høye utslippsskatten, virker ikke denne politikken. Det tredje beste alternativet er dermed å sette en høy utslippsskatt i dag, eller så lenge myndighetene klarer å binde seg, da det sikrer inntektene for innovasjoner som skjer i samme periode.

For å oppsummere; tidsinkonsistensproblemet oppstår dersom dagens myndigheter søker å påvirke miljøinnovasjonen ved å love en spesielt streng miljøpolitikk i fremtiden. Så lenge slike løfter ikke er troverdige, bør myndighetene heller øke miljøinnovasjonen ved å sørge for at FoU virkemidlene som FoU subsidier og/eller innovasjonspriser er tilstrekkelig doserte.

5.2 «Standing on shoulders»-effekten

Empiriske arbeider har vist at miljøinnovasjon både styres av tilbudssiden og etterspørselssiden. Et eksempel er Popp (2002) som ser på innovasjoner innenfor energieffektivisering. Han finner at antallet innovasjoner både avhenger positivt av energiprisene og av mengden kunnskap på feltet energieffektivisering. Tradisjonelt har økonomiske modeller som har studert «standing on shoulders»-effekten ikke skilt mellom ulike typer av kunnskap, se for eksempel Romer (1990). I det senere har det kommet bidrag hvor man har delt opp kunnskapsbasen i en skitten- og i en ren base. Det forutsettes da at den skitne kunnskapsbasen bare avhenger positivt av tidligere skitten forskning og *vice versa*. Dermed blir utviklingen i forskningen *historieavhengig* («path dependent»).

I Acemoglu, Aghion, Bursztyn, og Hemous (2012) velger et gitt antall forskere i hvilken sektor de vil jobbe med å utvikle innovasjoner. Valget avhenger av forventet økonomisk gevinst av å utvikle en ny idé i inneværende periode. Forventet inntekt avhenger av tre faktorer: Kunnskapsbasen innenfor feltet, markedspotensialet for idéen og prisen som kan forventes for idéen. Det antas at i utgangspunktet er kunnskapsbasen for skitne teknologier større enn den tilsvarende kunnskapsbasen for rene teknologier. I et referansescenario uten hverken miljøpolitikk og forskningspolitikk fører dette til at alle forskerne kun utfører innovasjoner i skitne teknologier og at forurensingen stiger eksponentielt.

En slik utvikling er opplagt ikke ønskelig, og Acemoglu m.fl. (2012) diskuterer hva som er god politikk for å stoppe økningen i forurensningen. Dersom «rene» og «skitne» teknologier enkelt kan substituere hverandre, og teknologiene på lang sikt har det samme potensialet, bør all forskningsinnsats umiddelbart flyttes til rene teknologier. Det vil gi et midlertidig fall i den økonomiske veksten, men fallet vil være mindre jo raskere det tas. På den annen side er det vanskelig å få til skiftet i forskningsinnsatsen utelukkende med en miljøskatt. I så fall må miljøskatten være svært høy i en overgangsperiode. Det er bedre å forskjellsbehandle skitne og rene teknologier mht. FoU-støtte: I Acemoglu m.fl. (2012) gis ren FoU så mye støtte relativt til skitten FoU at skitten FoU opphører.

Resultatet om at manglende støtte til miljøinnovasjon krever høyere utslippsskatter, dvs. i en «second best»-situasjon, finner vi også i andre (tidligere) bidrag, se f.eks. Greaker og Pade (2009) og Gerlagh, Kverndokk og Rosendahl (2009). Greaker og Pade (2009) sammenligner utslippsskatten i scenarier med og uten endogen miljøinnovasjon. Når miljøinnovasjonen er endogen og det ikke er subsidiering av miljø-FoU, blir utslippsskatten mer enn dobbelt så høy i de første årene som i tilfellet hvor miljøinnovasjonen er uavhengig av miljøpolitikken. Det nye i Acemoglu m.fl. (2012), og i litteraturen som har kommet i kjølvannet av denne studien, er at historieavhengighet i forskningsinnsatsen innebærer at myndighetene bør favorisere miljøinnovasjon i FoU politikken.

Det er flere forhold ved modellen til Acemoglu m.fl. (2012) som kan tenkes å drive de sterke resultatene. For det første er fordelingen av forskningsinnsats alltid en hjørneløsning dvs. all energiforskning skjer enten på skitne eller rene teknologier. For det andre får en forsker som lykkes kun inntekt fra sitt patent i en periode dvs. 5 år i deres modell. Greaker, Heggedahl og Rosendahl (2015) innfører patenter som varer inntil en annen forsker lanserer en bedre teknologi, og en «stepping on toes» effekt som gir indre løsning for allokeringen av forskere. Likevel repliseres de viktigste funnene fra Acemoglu m.fl. (2012). Selv om forventningene om en fremtidig streng miljøpolitikk nå får effekt på dagens forskningsinnretning, kreves det enten en vesentlig høyere miljøskatt eller et eget forskningssubsidie til miljøinnovasjon for å vende forskningsinnsatsen i tilstrekkelig grad mot rene teknologier. Årsaken er at verdien av den positive FoU eksternaliteten er større i ren forskning enn i skitten forskning når vi har en negativ miljøeksternalitet. Og videre at, så lenge en majoritet av (energi) forskerne jobber med rene

teknologier, så vil «creative destruction» effekten være størst her, noe som gir for lite incentiver til ren innovasjon i forhold til skitten innovasjon.

Konsekvensen av kort levetid på patenter er også studert i Gerlagh, Kverndokk og Rosendahl (2014). De ser spesielt på hvordan den optimale FoU politikken ovenfor karbonfrie energiteknologier påvirkes når patenter har endelig levetid. Dersom patentlevetiden er kort, vil en innovatør kunne miste mye av inntektene fra sin innovasjon fordi markedet for rene energiteknologier ikke rekker å bli stort innen patentets levetid. For en gitt patentlevetid, bør subsidiene til innovasjon innenfor karbonfrie teknologier derfor settes høyt på et tidlig tidspunkt, og så reduseres etterhvert som klimaproblemet blir større; jo større klimaproblemet er, jo høyere setter myndighetene klimaskatten, og jo høyere blir etterspørselen etter ren teknologi i dag og dermed inntektene fra et patent. Alternativt, hvis man ikke subsidierer forskning, bør patentlevetiden settes lenger på et tidlig stadium, men reduseres etterhvert som klimaproblemet blir mer alvorlig. Som i Acemoglu m.fl. (2012) er det viktig å stimulere til mer miljøinnovasjon tidlig fordi mer miljøinnovasjon i dag gir mer effektiv miljøinnovasjon i fremtiden.

Acemoglu, Akcigit, Hanley og Kerr (2014) er en oppfølging av Acemoglu m.fl. (2012) hvor særlig kalibreringen av modellen til data forbedret. For å gjøre kalibreringen enklere er rene teknologier perfekte substitutter med skitne teknologier. Dermed vil bare rene teknologer som i absolutt forstand er bedre enn skitne teknologier tas i bruk. Også i denne modellen er det optimalt for myndighetene å favorisere ren energi i FoU politikken. Det gjelder selv om forfatterne innfører et effektivitetstap på 20 % ved FoU-subsidiering.

Studien til Acemoglu m.fl. fra 2012 har også blitt fulgt opp av rene empiriske arbeider. I en studie av globale patentdata utført av Dechezleprêtre, Martin og Mohnen (2013) sammenlignes skitne og rene teknologier med hensyn til i hvilken grad de ulike patenttypene baserer seg på tidligere patenter («standing on shoulders»). De ser på teknologikategoriene «biler», «energi» og «belysning». Deretter klassifiserer de patentene som «rene», «skitne» og «grå».¹⁰ Dataene viser at eldre, rene patenter siteres mer av nye, rene patenter enn tilsvarende siteringshyppighet for skitne og grå patenter. Dette tar de som et tegn på at kunnskapsoverføringen fra dagens forskning til fremtidens forskning er sterkere for rene teknologier. De forsøker å forklare dette med at rene teknologier er nyere, og viser til at siteringshyppighetene for rene teknologier er på linje med andre nye teknologier, f.eks. bioteknologi.

En annen empirisk studie som følger opp Acemoglu m.fl. (2012) er Aghion, Dechezleprêtre, Hemous, Martin og Van Reenen (2014). De tar utgangspunkt i patentdataene for biler fra overnevnte studie. For det første finner de at det gir mening å dele opp i rene og skitne teknologier da rene patenter i mye større grad siterer tidligere rene patenter enn skitne patenter og *vice versa* for skitne patenter. For det andre viser de at nivået på dagens innovasjon innenfor de to teknologiene avhenger av størrelsen på kunnskapsdatabasen slik Acemoglu m.fl. (2012)

¹⁰ Rene patenter innenfor kategorien «biler» omfatter alt som kan knyttes til elbiler, mens et eksempel på et skittent bilpatent kan være en ny type 12-sylinder bilmotor. Grå patenter er f.eks. en teknologi som reduserer drivstoffbruket i biler per kjørte kilometer.

forutsetter. Siden skitne teknologier har en større kunnskapsbase i utgangspunktet¹¹, blir det en tendens til at innovasjon skjer innenfor skitne teknologier fremfor innenfor rene teknologier. Basert på simuleringer viser de at det kreves en 40 % prisøkning på fossile brensler (fra 2005) dersom kunnskapsbasen for rene teknologier skal komme opp på samme nivå som kunnskapsbasen for skitne teknologier innen 2020. Dette innebærer en betydelig økning i CO₂-avgiftene på globalt nivå.

Bidragene som er nevnt over tar utgangspunkt en global økonomi hvor både miljøpolitikk og forskningspolitikk settes optimalt. I den numeriske modellen WITCH (se f.eks. Bosetti, Carraro, Massetti og Tavoni, 2008) bestemmes isteden forskningspolitikken av det enkelte land (region). Overføringen av forskningsfunn mellom land og absorpsjonskapasiteten hos det enkelte land dvs. evnen til å benytte andre lands forskningsresultater, blir da sentral. Bosetti et al (2008) sammenligner kostnadene ved å nå et gitt utslippsmål i to scenarier; med og uten overføring av forskning mellom land. Siden det enkelte land ikke tar hensyn til at andre land drar fordeler av deres forskning og selv kan dra fordel av andre lands forskning, blir forskningsinnsatsen lavere når det er overføring av forskning mellom land. På den annen side gjør overføringen av forskning at all forskning benyttes bedre, og dermed har omfanget av overføringen lite å si for kostnadene for å oppfylle et gitt klimamål. Bosetti et al. (2008) finner også at det å øke absorpsjonskapasiteten hos land som ikke selv forsker i særlig grad, kan være et effektivt virkemiddel. Det påvirker ikke total forskning, men senker de globale rensekostnadene gjennom kunnskapsoverføring.

Bosetti, Carraro, Massetti, Sgobbi og M. Tavoni (2009) bruker samme modell til å analysere teknologipolitikk. De understreker at forskning spesielt innenfor transport teknologier som gir null-utslipp vil være essensielt de kommende årene for å nå FN's togradersmål. Videre vil oppnåelse av togradersmålet kreve omfattende investeringer i bl.a. fornybar energi og karbonrensing. Som Acemoglu m.fl. (2012) argumenterer de for at en aktiv teknologipolitikk bør komme som et supplement til miljøskatter. De understreker imidlertid at en aktiv teknologipolitikk ikke kan erstatte miljøskatter.

5.3 Barrierer for foredling av ny miljøteknologi

Læringskurver har etterhvert blitt anvendt i flere empiriske arbeider innenfor energi og klima. For det første er det gjennomført flere økonometriske studier av læringskurver basert på historiske data som alle viser at enhetskostnadene i sol- og vindkraft er fallende med akkumulert produksjon (se f.eks. IEA, 2000). En nyere studie viser også at prisen på litiumbatterier kan falle med rundt 75 prosent frem til 2025, se Hensley, Newman og Rogers (2012). I studien deles batterikostnaden opp i 40 komponenter. De viktigste faktorene bak kostnadsreduksjonen er i) stordriftsfordeler og økt produktivitet (en tredel), ii) lavere priser på komponentene i et batteri (en firedel), og iii) økt batterikapasitet (40 prosent).

¹¹ De bruker antall patenter som en proxy på kunnskapsbasen. Deres datasett inneholder 6419 rene patenter og 18652 skitne patenter.

Læringskurver har en klar intuitiv appell: Dagligdags observasjoner støtter tankegangen om at erfaring har betydning for produksjonsprosesser. Likevel er det rimelig å karakterisere standard læringskurver som for enkle; det er selvsagt mange andre faktorer som påvirker produksjonsprosessers effektivitet enn akkumulert produksjon, bl.a. forskning og utvikling, kunnskapsoverføringer mellom personer og bedrifter, samt stordrifts- og breddefordeler. I de fleste empiriske studier av læringskurver har slike forhold blitt neglisjert, og dermed blir estimatet på læringseffekten, for eksempel målt som hvor kraftig produksjonskostnadene faller når produksjonen dobles, skjeve. Dette vil ha betydning for hvor store tiltak man skal sette inn for å rette opp eksternalitetene som følge av læring.

Nordhaus (2009) drøfter kilder til skjeve læringsestimater innenfor en stilisert økonomisk modell som omfatter både etterspørsel og tilbud, og der kostnadsstrukturen rommer en standard læringskurve. Innenfor denne modellen kreves det tilleggsinformasjon om diverse økonomiske forhold, bl.a. etterspørselastisitet og autonom teknologisk fremgang, for å kunne identifisere læringseffekten. Han viser også at selv om en har denne tilleggsinformasjonen, vil den estimerte læringseffekten bli for høy. I numeriske modeller der læringskurver anvendes, vil marginalkostnaden til teknologier med feilaktig høye læringsrater bli for lav. Dermed får disse teknologiene en for stor andel i den antatte optimale teknologiporteføljen.

Nordhaus' kritikk av økonometriske arbeider om læringskurver blir fulgt opp i Witajewski-Baltvilks, Verdolini og Massimo (2015). Forfatterne argumenterer for at tidligere estimeringer av læringskurver ikke har klart å identifisere den partielle effekten av læring. Dette skyldes to forhold: For det første utelatte variable, jmf. Nordhaus' kritikk, og for det andre endogenitetsproblemer. Det siste avspeiler at hvis økte investeringer i en teknologi (og dermed økt produksjon av en vare) leder til lavere kostnader, bør kostnadsfallet gjøre det mer attraktivt å investere i denne teknologien.

Witajewski-Baltvilks m.fl. (2015) stiller opp tilstrekkelige betingelser for å kunne identifisere den rene læringseffekten. Videre foretas det estimeringer av læringskurver som et godt stykke på vei oppfyller disse kriteriene. Disse resultatene sammenliknes med resultater fra tradisjonelle estimeringer av læringskurver. Studien finner at med den alternative estimeringsmetoden øker læringsraten for solkraft, mens det motsatte er tilfelle for vindkraft.

Læringskurver blir også brukt i numeriske modeller. Fischer og Newell (2008) antar for eksempel at det er læring knyttet til fornybare teknologier, men ikke til fossilbaserte teknologier. Produksjonskostnadene ved en fornybar teknologi er fallende i kunnskapskapitalen, som avhenger av både kumulativ FoU kunnskap og kumulativ produksjon av fornybar energi. I modellen er det flere kilder til positive eksternaliteter (læring, FoU og kunnskapsoverføringer), samt én kilde til negativ eksternalitet (utslipp av drivhusgasser). Optimal politikk krever derfor bruk av flere virkemidler. Fischer og Newell studerer også tilfellet der kun ett virkemiddel skal implementeres for å nå et utslippsmål. For elektrisitetssektoren i USA finner studien følgende rangering av virkemidler: (1) utslippspris, (2) utslippsstandard, (3) skatt på bruk av fossile

brensler, (4) pålagt fornybarandel, (5) subsidie til fornybar produksjon og (6) FoU subsidie. Studien finner videre at valg av politikkvirkemiddel er langt viktigere enn kunnskapsakkumulasjon.

Chakravorty, Leach og Moreaux (2011) ser på betydningen av læringskurver for elektriske biler. Spesielt er de opptatt av om oljeprodusenter vil finne det optimalt å produsere mer olje nå for å forhindre læring i elektriske biler som på sikt vil kunne utkonkurrere olje som drivstoff. Dette kan skje dersom læringsgevinster lett overføres fra bedrift til bedrift slik at ingen enkelt elbilprodusent har incentiv til å utvikle elbilmarkedet gjennom å prise sine elbiler lavt i starten for å utvikle markedet. Strategisk lave oljepriser kan i et slikt tilfelle forsinke introduksjonen av elektriske biler, og være profitabelt for oljeprodusentene.

Hovedkonklusjonene fra den (tynne) teorilitteraturen er at læringseffekter kan lett lede til sterk konsentrasjon, se kapittel 3.2, men at høy læringsrate kan være det mest gunstige for samfunnet. Numeriske arbeider finner at læring kan ha stor betydning for optimal sammensetning av teknologier, men at det er langt viktigere å implementere virkemidler rettet direkte mot utslipp av drivhusgasser enn å tilby teknologistøtte til klimavennlige teknologier. Nyere økonometrisk litteratur argumenterer for at tidligere estimater på den isolerte læringseffekten har vært skjeve, men det er ennå ikke avklart om læringseffekten systematisk har blitt overestimert. Alt i alt tilsier faglitteraturen at eksistensen av positive læringseffekter gir et rasjonale for å støtte bedrifter i foredlingsfasen, for eksempel gjennom subsidier. Ettersom det ikke er avklart om det er systematikk i skjevheten, bør en være forsiktig med å basere seg på et det er for høye estimater for læringseffekten. Videre er et kjernetema i teorilitteraturen at læringseffekter kan lede til konsentrasjon, og at de få gjenværende bedriftene kan høste profitt. Hvis derfor en norsk bedrift er tidlig ute med et produkt, tilsier norske særinteresser å støtte denne bedriften i foredlingsfasen slik at den klarer å etablere seg i markedet.

På den annen side, fra et globalt velferdsperspektiv kan potensielle innlåsingseffekter være et argument mot å subsidiere læringseffekter. I henhold til standard samfunnsøkonomisk teori bør aktiviteter som genererer teknologiske spillovere motta subsidier, men støtte til eksisterende, nesten konkurransedyktige energiteknologier kan bremse utviklingen av nye, mer umodne energiteknologier (se f.eks. Johnstone et al., 2010, som er omtalt i kapittel 4.3). Denne kostnaden må balanseres mot gevinsten ved å subsidiere dagens teknologier, se Kverndokk, Rosendahl og Rutherford (2004). Dette er fulgt opp i Kverndokk og Rosendahl (2007). Innenfor en numerisk simuleringsmodell blir det vist at velferdstapet ved slike innlåsingseffekter kan bli stort hvis i) kostnadene ved nye teknologier er så høye at disse ikke ville vært lønnsomme uten subsidier, og ii) de nye teknologiene har et stort læringspotensial. Da kan faktisk ingen subsidie være bedre enn en subsidie.

5.4 Barrierer for markedsspredning av ny miljøteknologi

De private incentivene til å investere i FoU og læring, avhenger hvor stor suksess den nye teknologien forventes å bli i markedet. Størrelsen på suksessen, eller spredningen av den nye miljøteknologien, vil videre påvirkes av miljøpolitikkinstrumentet som velges, se også 4.3. Fra slutten av åttitallet og frem til begynnelsen av 2000-tallet var det en teoretisk litteratur som sammenlignet i hvilken grad miljøpolitikkinstrumenter ga incentiver til miljøinnovasjon og i hvilken grad en ferdig utviklet ny renseteknologi ville bli brukt av forurensende bedrifter, gitt ulike politikkvirkemidler, se f.eks. Downing og White (1986), Milliman og Prince (1989), Jung, Krutilla og Boyd (1996) og Requate og Unhold (2003). Ulik grad av adopsjon, gir ulike fortjeneste muligheter, og denne litteraturen har derfor relevans for hele innovasjonsprosessen.

Utgangspunktet i bidragene som er nevnt over er at det fins et gitt antall forurensende bedrifter som enten kan fortsette å bruke en gammel renseteknologi eller investere i en ny renseteknologi. Den nye teknologien gir lavere renseskostnad, men kan impliserer en fast (installerings)kostnad. Dersom myndighetene har forpliktet seg til en skatt før innovasjonen foreligger, vil skatten ikke være avhengig av hvor mange bedrifter som adopterer innovasjonen. Hvis alternativt et kvotesystem innføres, vil kvoteprisen være lavere jo flere bedrifter som adopterer den nye renseteknologien. Dermed vil også incentivene for å adoptere ny teknologi bli mindre (for et gitt antall kvoter). Litteraturen konkluderer med at skatter gir høyere incentiver til å adoptere ny teknologi enn omsettbare kvoter som igjen gir høyere incentiver enn standarder (se for eksempel oversiktsartikkelen til Jaffe, Newell and Stavins, 2003). Requate og Unhold (2003) viser også at dersom myndighetene kan justere kvotetaket eller utslippsskatten etter at innovasjonen foreligger og etter at bedriftene har gjort sine investeringsbeslutninger, vil begge instrumentene gi optimal adopsjon. Myndighetene har med andre ord ikke noe tidsinkonsistensproblem. På den annen side tar Requate og Unhold verken hensyn til at noen må investere i FoU for å utvikle den nye teknologien, eller at politikken kan påvirke prissettingen av den nye teknologien slik som diskutert i 4.1.

Studiene som er sitert ovenfor konkluderer også med at ikke-markedsbaserte reguleringer, f.eks. teknologistandarder eller ikke-omsettbare kvoter, gir lavere insentiver til innovasjon. En ny studie basert på norske patentdata (Bye, Klemetsen og Raknerud, 2013) finner imidlertid at slike reguleringer har hatt en signifikant effekt på innovasjonsnivået, gitt at det er en trussel om økte kostnader ved sanksjoner hvis man ikke oppfyller reguleringen. Studien kan imidlertid ikke si noe om i hvilken grad en miljøskatt ville gitt mer innovasjon. Konklusjonen til Jaffe, Newell and Stavins (2003) om at markedsbaserte miljøpolitikkinstrumenter gir mer innovasjon ser derfor ut til å holde fortsatt.

Få har analysert nettverkseffekter i forbindelse med miljøteknologi. Nettverkseffekter kan være direkte eller indirekte. Kommunikasjonsnettverk er et eksempel på det første: Jo fler som har avansert utstyr for videomøter, jo mer nytte har hver enkelt av slikt utstyr, og i mindre grad vil de antagelig velge å fly til møtestedet. Elbiler kan være et eksempel på det andre: Jo flere elbiler, jo

mer lønnsomt vil det være å etablere ladestasjoner. Og jo flere ladestasjoner det er, jo enklere vil det være å kjøre rundt i en elbil. Karbonfangst og lagring kan være et annet eksempel: Jo flere som driver karbonfangst, jo mer lønnsomt vil et rørtransportnettverk for CO₂ kunne bli. Et annet eksempel er tungtransport drevet av naturgass eller ren hydrogen; jo flere som bruker slike biler, jo mer lønnsomt vil det være å bygge ut fyllestasjoner.

Greaker og Midttømme (2014) utvikler en modell med nettverkseffekter hvor det er et rent og et skittent gode. Modellen er dynamisk, og i hver periode er det en viss andel av markedet som skal velge teknologi. Firmaer kan ha eksklusivt eierskap til de to teknologiene. Myndighetene setter en skatt på det skitne godet. Et resultat er at den optimale skatten på det skitne godet ikke bare skal ta hensyn til den forventede forurensningen fra personen som kjøper godet. Den skal også ta høyde for at hver gang noen kjøper det skitne godet, øker sannsynligheten for at flere kjøper det skitne godet i framtiden. Man skal derfor skattlegges for mer enn sin egen forurensning. Dette er et nytt resultat som viser forskjell mellom miljønnovasjon og annen innovasjon. De positive nettverkseffektene som skitten teknologi skaper ved bruk vil være negative for spredning av miljønnovasjon.

For å illustrere størrelsen på denne effekten kalibrerer Greaker og Midttømme (2014) modellen til det norske markedet for personbiler. Uten netteverkseffekter vil den optimale skatten være konstant og lik marginalkostnaden ved å redusere klimagassutslipp andre steder i økonomien (Pigouskatten). Inkluderer nettverkseffekter viser simuleringresultatene at den optimale skatten på skitne biler er avhengig av markedsandelen på rene biler. I deres hoved tilfelle starter skatten høyere enn Pigouskatten, videre stiger den inntil andelen rene kjøretøyer har nådd en kritisk masse for netteverkseffektene, og faller deretter mot Pigouskatten.¹²

Betydningen av nettverkseffekter kan kanskje illustreres ved Tesla, som på mange måter har revolusjonert markedet for el-biler, annonserte i 2014 at de vil frigi alle sine patenter. Dette betyr at det vil være fritt fram for alle å benytte seg av Teslas innovasjoner. Så hvorfor gjør Tesla dette? Hvis det kommer flere el-biler på markedet ved at andre produsenter får tilgang til Teslas patenter, vil dette kunne føre til flere investeringer i nødvendig infrastruktur som ladestasjoner, en velfungerende annenhåndsmarked etc. Dette vil redusere en barriere for kjøpere av el-biler, og total markedet blir større, noe Tesla kan tjene på selv om de mister monopolmakten over sine innovasjoner.

En annen type barrierer for utbredelse av nye miljøteknologier kan være at konsumentene eller produsentene ikke har tilstrekkelig informasjon, eller at de ikke er så rasjonelle som man ofte antar i økonomisk teori, se Hauge (2014) og Eide, Harsem, Kverndokk og Tennbakk (2013). Hauge (2014) fokuserer på den siste grunnen nemlig at husholdningene ikke er rasjonelle i økonomisk forstand ved å ta utgangspunkt i innsikt fra adferdsøkonomien hvor husholdningene

¹² Modellen er en svært forenklet representasjon av transportmarkedet, og egner seg bare til å illustrere betydningen av nettverkseffekter. De antar gitt størrelse på bilmarkedet, gitt kjørelengde og teknologier som er like gode (hvis de har like store nettverk).

enten kan ha begrenset rasjonalitet, viljestyrke eller egeninteresse. Hun bruker energieffektivisering som et eksempel. Selv om mange energieffektiviseringstiltak vil være billige å gjennomføre, vil utbredelsen av dem være lavere enn det man kunne forvente.

Begrenset viljestyrke kan være en årsak til dette. Et individ kan verdsette nåtiden mye mer enn fremtiden på en slik måte at nåtiden får en ekstra verdi ved beslutninger; man faller for fristelser og utsetter kostnader og tidsvalgene blir inkonsistente. Man foretar derfor ikke lønnsomme investeringer hvis de har en høy investeringskostnad og gevinstene kommer lengre fram i tid. En måte å bøte på dette på kan være å utsette betalingen. Investeringskostnadene kan konverteres til en annuitet som betales i takt med at besparelsene i energiforbruket inntreffer. Kundene kan f.eks. betale avdragene på investeringene gjennom strømrregningen.

I Norge har vi også et system for engangsavgifter på biler som generelt favoriserer biler med lave utslipp. Det finnes empirisk litteratur på hvordan differensierte bilavgifter påvirker sammensetningen av bilflåten, og noen av resultatene kan tyde på begrenset rasjonalitet. Gallagher og Muelhlegger (2011) finner f.eks. at en reduksjon i engangsavgiften har vesentlig større effekt på hybridbilsalget enn en tilsvarende reduksjon i inntektsskatten. De finner også at konsumentene har en forholdsvis høy diskonteringsrente når det gjelder å verdsette bedre drivstofføkonomi (14,6%).

En annen form for barriere er når husholdningene har begrensede kognitive ressurser slik at de ikke nødvendigvis klarer å ta rasjonelle valg. De klarer f.eks. ikke å hente inn og bruke nødvendig informasjon, men benytter enkle tommelfingerregler når beslutninger skal tas. Eksempler på dette kan være å forholde seg til enkel informasjon om energiforbruk når man f.eks. kjøper energikrevende apparater som kjøleskap eller vaskemaskiner. Generelle informasjonskampanjer om energiforbruk vil gi liten effekt, men å skreddersy informasjon til hver enkelt husholdning ved en enøk-analyse kan gi reduksjoner i energiforbruket (Abrahamse, Steg, Vlek og Rothengatter, 2005). Alternativt kan man skreddersy informasjon om faktisk energiforbruk.

6. Konsekvenser for Norge

Analysen til Acemoglu m.fl. (2012) har et globalt perspektiv. Den viser hva som ville ha vært optimalt dersom vi hadde en global planlegger som fastsatte FoU-subsidier og utslippsskatter. Modellene gir bl.a. argumenter for en høyere karbonskatt enn en betraktning basert kun på skadene ved utslipp; dette vil redusere innovasjonene innen skitne teknologier og dermed gjøre det lettere å få til et grønt teknologiskift.

Selv om det kan være lønnsomt for verden å skifte FoU-innsats til ren teknologi, er det ikke nødvendigvis lønnsomt for Norge i dag. Det er ikke tenkelig at Norge alene kan utføre så mye ren FoU at den globale kunnskapsbasen for ren teknologi blir større enn den tilsvarende skitne kunnskapsbasen, noe som er målsetningen med den aktive FoU-politikken i modellen til

Acemoglu m.fl. (2012). Norge får dessuten fortsatt store inntekter fra petroleumsekstraksjon, og nye ekstraksjonsteknologier (dvs. skitne teknologier) kan øke disse inntektene. Dette kan dermed være en veldig dyr politikk for oss, og andre alternativer bør derfor vurderes opp mot dette.

To bidrag har analysert en målrettet teknologipolitikk i Norge ved hjelp av en numerisk generell likevektsmodell for norsk økonomi med endogen teknologisk utvikling. Bye og Jacobsen (2011) ser på politikkeksperimenter der FoU-midler reallokeres fra generell FoU til FoU på karbonfangst og -lagring. De får et tap i velferd ved å reallokere til karbonfangst og -lagring. Forskjellen i velferd mellom de to scenarioene blir imidlertid mindre dersom karbonskatten øker. Studien er ulik Acemoglu m.fl. (2012) siden den har konkurranse mellom generell FoU og en spesiell type ren FoU, og ikke mellom skitten og ren FoU. Generell FoU påvirker alle sektorer i økonomien og vil derfor tendere til å ha en høyere verdi, mens FoU på karbonfangst og -lagring bare påvirker gasskraft i Bye og Jacobsens modell. Forfatterne konkluderer at reallokering til FoU på karbonfangst og -lagring kunne ha kommet bedre ut dersom denne teknologien hadde hatt anvendelse i flere typer industri.

Heggedahl og Jacobsen (2011) bruker same modell som Bye og Jacobsen (2011), og finner som dem at reallokering av FoU-ressurser mot miljønnovasjon framstår som mer lønnsomt jo høyere karbonskatten er. Videre finner de at FoU-subsidiene til miljønnovasjon bør være høyest i starten fordi de positive eksterne effektene av slik FoU da er størst. Dette resultatet ligner på resultatet i Acemoglu m.fl. om at FoU-subsidien til rene teknologier kan være midlertidig. I Heggedahl og Jacobsen (2011) ser resultatet imidlertid ut til å være drevet av en annen mekanisme, nemlig at «standing on shoulders»- effekten er avtagende i kunnskapsbasen. I Acemoglu m.fl. er derimot FoU-innsatsen gitt, og hensikten med subsidien er ikke å øke total FoU, men å flytte forskerne fra skitten til ren teknologi.

Norge er et lite land og det er derfor naturlig at mye av den nye teknologien som tas i bruk er hentet fra utlandet. Dette utelukker likevel ikke at det kan være lønnsomt for Norge å utvikle noen utvalgte renseteknologier. Norge har en uttalt målsetning om å arbeide for en global klimaavtale. Golombek og Hoel (2009) og Greaker og Hagem (2012) viser at det kan lønne seg for et land å investere i utvikling av klimavennlig teknologi siden det kan gjøre andre land mer interessert i å redusere sine utslipp. Dette vil igjen påvirke landene som investerer gjennom lavere globale utslipp, og er en gevinst av teknologiutvikling som private aktører ikke tar hensyn til. Slike effekter er heller ikke inkludert i Bye og Jacobsen (2011) og Heggedahl og Jacobsen (2011).

Norge er verdensledende innenfor utvikling av teknologi for dypvannsoljeproduksjon (TU, 2014) og kan kanskje bli det samme innenfor enkelte utvalgte klimateknologier som karbonfangst og -lagring. Under spesielle betingelser kan det i så tilfelle lønne seg for en region eller et enkelt land å subsidiere eksport av teknologiene. Dette er tema i Fischer, Greaker og Rosendahl (2014) og Fischer, Greaker og Rosendahl (2015). Begge bidragene analyserer subsidier til miljøteknologi i en setting der det er internasjonal handel med miljøteknologi, og land har ulik miljøpolitikk på

tross av at miljøproblemet som studeres er grenseoverskridende¹³. Et hoved resultat er at det er mer robust å subsidiere oppstrøms aktiviteter enn nedstrøms aktiviteter. Det vil si at istedenfor å betale deler av produksjonsbedriftenes reinvesteringer, bør myndighetene heller betale deler av renseteknologileverandørens kostnader. Subsidiert eksport av miljøteknologi vil for det første kunne redusere utslippene i utlandet, og gi lavere miljøkostnader for alle land i modellen. Videre vil subsidier til eksport av teknologiene kunne medføre at nasjonale bedrifter får en større andel av verdensmarkedet for disse teknologiene. Så fremt det er imperfekt konkurranse basert på kapasitetsgrenser hos den enkelte leverandør (Cournot type konkurranse), vil land som velger denne formen for miljøteknologisubsidiering kunne øke sin velferd. Og til forskjell fra andre handelspolitiske tiltak er dette ikke en «*beggar thy neighbor*» politikk, men kan gavne hele verden.

Anvendt på Norge kunne man tenke seg at Norge f.eks. subsidierte eksport av karbonfangstteknologi som ledet til lavere utslipp av klimagasser ute. Dette er tema i Golombek, Greaker, Kittelsen og Gaure (2015) som analyserer teknologipolitikk for karbonfangstteknologier for kull- og gasskraft i EU ved hjelp av en numerisk modell. I tillegg til effektene som er nevnt over, indikerer deres studie at støtte av EU bedrifter som kan levere karbonfangstteknologi for gasskraft kan være lønnsomt for Norge da det også vil kunne øke verdien av norsk naturgass.

Norske klimamålsetninger innebærer at Norge skal bli et karbonfritt samfunn innen 2050 (se f.eks. Innstilling til Stortinget fra Energi og Miljøkomitéen, 2011). Dette vil kreve at vi tar i bruk nye miljøteknologier som i stor utstrekning vil komme utenfra. Cohen og Levinthal (1989) argumenterer for at et lands FoU innsats ikke bare gjør at landet selv finner opp mer, men også at landet lettere tilegner seg ny kunnskap utenfra, noe som de betegner som et lands *absorpsjonsevne*. Denne hypotesen er senere blitt bekreftet bla. gjennom arbeidet til Griffith, Redding og Van Reenen (2004). Økt absorpsjonsevne for nye miljøteknologier er dermed et annet argument som går i retning av å støtte norsk FoU-innsats på miljøvennlig innovasjon. Slik satsning vil både gi oss høy ekspertise på utvalgte områder, og gjøre det lettere å benytte seg av andre lands ekspertise.

Norge fører en aktiv markedsspredningspolitikk ovenfor elbiler som er fritatt for både engangsavgift og merverdiavgift. Politikken medfører tap av store skatteinntekter (se Holtmark og Skonhoft, 2014), men ser ut til å være effektiv hvis målet utelukkende er å øke andelen elbiler i den norske bilflåten. Eksistensen av nettverkseffekter for elbiler kan begrunne en aktiv politikk, men størrelsen på disse effektene er ukjente, og studien til Greaker og Midttømme (2014) må kun forstås som en indikasjon på at nettverkseffekter kan ha stor betydning i en introduksjonsfase. Nettverkseffekter betyr at den optimale skatten på forurensning (for eksempel CO₂) ikke bare

¹³ Studiene skiller seg ellers fra hverandre både mht. hvilket miljøpolitikkinstrument som brukes og mht. i hvilken grad det er utslippslekkasje som følge av forskjellene i miljøpolitikk mellom regionene.

skal ta hensyn til skaden av utslippene, men også at bruk og kjøp av forurensende biler øker sannsynligheten for at flere kjøper skitne biler i framtiden.

Tidsinkonsistensproblemet som vi har diskutert over har også relevans for Norge. Ikke fordi bedrifter vil tro at vi vil avvikle den nåværende CO₂-avgiften, men fordi bedrifter kan mangle tillitt til våre vedtatte klimamål for eksempel som følge av manglende måloppfyllelse tidligere. Det er ikke dagens klimapolitikk som har betydning for dagens innovasjon og diffusjon av miljøvennlig teknologi, men hva innovatørene tror om framtidig klimapolitikk. Fæhn og Isaksen (2014) har studert dette for Norge. Ved hjelp av en numerisk generell likevektsmodell for Norge sammenligner de utfallet i to scenarier: Ett hvor privat sektor har tillitt til at framtidig karbonskatter skal bli høye og investerer i ny teknologi nå, og ett hvor privat sektor mangler denne tillitten og dermed ikke investerer i ny teknologi. Nye teknologier omfatter bla. karbonfangst- og lagring for industri og lavutslippstransport.

Fæhn og Isaksen (2014) viser at det blir tre ganger så dyrt for Norge å oppfylle sin utslippsmålsetting dersom det ikke foretas investeringer ny teknologi. Lav troverdighet omkring framtidig karbonskatter kan derfor tenkes å bli en selvoppfyllende profeti: Fordi private aktører ikke investerer i miljøteknologier, vegrer myndighetene seg mot å innføre den annonserte miljøpolitikken. Fæhn og Isaksen viser at problemet kan løses ved å tilby subsidier til miljøteknologi i dag slik at det blir politisk mulig å sette høye karbonskatter i framtiden. Alternativt kan myndighetene forplikter seg juridisk til å holde høye karbonskatter (f.eks. gjennom en klimalov).

Det internasjonale bildet vil også ha betydning for Norges satsing på miljønnovasjon og fornybar energi. Hvis den rike delen av verden ønsker at den fattige delen skal bekjempe fattigdom og nyte fruktene av økonomisk vekst, vil utslippene fra disse landene øke, i alle fall på kort sikt. Dette betyr at rike land må ta et større ansvar for klimaproblemet, også i satsingen på fornybar industri. Kverndokk, Nævdal og Nøstbakken (2014) viser at hvis landene bryr seg om både klimaproblemet og materiell ulikhet i verden, må rike land investere mer i ren teknologi og fattige land mer i skitten teknologi innenfor en klimaavtale. Årsaken er at skitten teknologi er mer produktiv på kort sikt, og dermed vil gi høyere økonomisk vekst.

Norges nylig vedtatte klimamål (Meld. St. 13, 2014-15) vil ha konsekvenser for innovasjonspolitikken. En klimaavtale med EU innebærer fleksibilitet, dvs. at Norge kan bytte egne kutt mot kutt i EU-land. Norge får dermed mulighet til å utsette klimaomstillingene, men før eller senere må trolig også vi gjennom en radikal omstilling gitt at målsetningen om at Norge skal bli et lavkarbonsamfunn i 2050 står ved lag. Den tilhørende kostnaden vil avhenge av de tilgjengelige miljøteknologiene i framtiden - bedre og billigere teknologi vil gjøre omstillingen lettere. Som nevnt er dette et argument for en aktiv politikk for grønn innovasjon, også i Norge.

7. Konklusjoner

Basert på diskusjonen så langt, konkluderer vi med følgende politikk anbefalinger:

- Innovasjon innenfor nye miljøteknologier styres både av tilgjengelig kunnskap og forventningene om fremtidig miljøpolitikk. Da kunnskapsbasen for karbonfrie energiteknologier er mindre enn kunnskapsbasen for karbonbasert energiteknologier, bør forskning på karbonfrie energiteknologier favoriseres i myndighetenes FoU budsjetter.
- Det er usannsynlig at Norge kan få til et skifte fra skitne til rene teknologier alene. Norge bør derfor arbeide for at FoU på rene teknologier trappes opp internasjonalt. Mye tyder også på at forskning på fossil teknologi bør trappes ned internasjonalt.
- Miljøpolitikk og innovasjonspolitikkk vil begge påvirke utviklingen av miljøvennlig teknologi. Manglende miljøpolitikk kan kompenseres av mer offentlig støtte til miljøinnovasjon og utilstrekkelig støtte til miljøinnovasjon kan kompenseres med en strengere miljøpolitikk. Dette vil bli dyrere enn om virkemidlene settes optimalt, dvs. korrigerer for de eksterneffektene de er ment til å korrigere.
- Myndighetene kan velge å beskutte bruk av skitne teknologier hardere enn det kostnaden ved utslipp tilsier for å kompensere for utilstrekkelig støtte til miljøinnovasjon. Imidlertid er det da en fare for at miljøpolitikken er tidsinkonsistent. Det gjelder særlig hvis man søker å påvirke nivået på miljøinnovasjonen gjennom å love høye miljøskatter i framtiden.
- Tidsinkonsistensproblemet tilsier at privat sektor kan bli usikre på om fremtidige miljøskatter vil være så høye som myndighetene annonserer. Nivået på privat miljø FoU, samt foredling og spredningen av ny miljøteknologi, kan derfor bli for lavt. Prinsipielt kan dette løses ved at myndighetene binder seg til en gitt miljøpolitikk (eller ved at den offentlige støtten til miljøinnovasjon økes).
- Både teoretisk og empirisk litteratur tyder på at miljøskatter og omsettbare kvoter er mer effektive enn direkte reguleringer når det gjelder å spore til innovasjon og diffusjon av ny miljøteknologi.
- Dagens grønne sertifikatsystem og innblandingsmandat for biodrivstoff ser ut til å fungere dårlig hvis målet er å fremme ny, umoden miljøteknologi. Slik teknologi fremmes bedre av mer teknologispesifikke virkemidler som feed-in tariffen hvor de garanterte minimumsprisene på elektrisitet er avhengig av teknologien. Kostnadseffektiviteten ved disse virkemidlene er imidlertid omstridt.
- Patenter gir eiendomsrett til innovasjoner, men vil begrense utbredelsen av ny miljøteknologi. Myndighetene bør vurdere å bruke innovasjonspriser som virkemiddel for å få til miljøinnovasjon.
- Nye teknologier hvor det enten er store potensielle læringsgevinster eller netterverkeffekter kan fordre en spesialdesignet politikk for å sikre markedsspredning i en tidlig fase. Slik politikk bør være midlertidig. Videre bør man sette klare mål for hva politikken skal oppnå, og når det skal oppnås. Dermed kan man terminere den

spesialdesignede politikken dersom f.eks. forventet læring ikke inntreffer, eller dersom det rene nettverksgodet ikke viser seg å være et like godt substitutt som først antatt.

- Norge er et lite land og vil derfor ta i bruk mange miljøinnovasjoner som utvikles i andre land. Det er likevel gode grunner til at Norge bør ha FoU på miljøvennlig teknologi da det vil øke vår evne til å ta i bruk annen teknologi (absorpsjonskapasitet), samt at vi kan få et konkurransefortrinn på utvalgte renseteknologier.
- Dersom Norge ønsker å bidra til å utvikle klimavennlige energiteknologier, bør Norge velge teknologier med stort eksport potensiale.

Referanser

Abrahamse, W., L. Steg, C. Vlek og T. Rothengatter (2005): A review of intervention studies aimed at household energy conservation, *Journal of Environmental Psychology*, 25(3): 273-291.

Acemoglu, D., U. Akcigit, D. Hanley og W. Kerr (2014): Transition to clean technology, Working paper 15-045, Harvard Business School.

Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn, og D. Hemous (2012.): The Environment and Directed Technical Change, *American Economic Review* 102, 131-166.

Aghion P., A. Dechezleprêtre, D. Hemous, R. Martin og J Van Reenen (2014): Carbon Taxes, Path Dependency and Directed Technical Change: Evidence from the Auto Industry, CEP Discussion paper 1178, kommer i *Journal of Political Economy*.

Aghion P. og Howitt (1992): A Model of Growth Through Creative Destruction. *Econometrica* 60-2, p. 323-351.

Arrow, K. J. (1961): The economic implications of learning-by-doing, *Review of Economic Studies*, Vol. 29, 155-173.

Arrow, K. J. (1962): Economic Welfare and the Allocation of Resources for Innovations, i R. Nelson (red.) *The Rate and Direction of Inventive Activity*, Princeton University Press.

Arthur B. W. (1989): Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events, *The Economic Journal* 99/394: 116-131

Baker E., O. Olaleye og L. A. Reis (2015): Decision frameworks and the investment in R&D, kommer i *Energy Policy*.

Barrett, S. (1999), Montreal versus Kyoto: International Cooperation and the Global Environment, Global Public Goods, UNDP.

Boldrin M., og D. K. Levin (2009): Against Intellectual Monopoly, *Syracuse Science & Technology Law Reporter*, 21(6): 130-145.

<http://levine.sscnet.ucla.edu/general/intellectual/against.htm>

Bosetti V., C. Carraro, E. Massetti and M. Tavoni (2008), International energy R&D spillovers and the economics of greenhouse gas atmospheric stabilization, *Energy Economics* 30, p. 2912-2929.

- Bosetti V., C. Carraro, E. Massetti, A. Sgobbi and M. Tavoni (2009), Optimal energy investments and R&D strategies to stabilize atmospheric greenhouse gas concentrations, *Resource and Energy Economics* 31, p. 123-137.
- Brennan T. J., M. K. Macauley and K. S. Whitefoot (2012): Prizes or Patents for Technology Procurement, DP 11-21, Resources for the future, Washington DC.
- Bryan, W. L. og N. Harter (1899): Studies on the telegraphic language: The acquisition of a hierarchy of habits. *Psychology Review*, 6, 345-375.
- Burtraw D. and K. Palmer (2003): The Papparazzi Take a Look at a Living Legend: The SO₂ Cap and Trade Program for Power Plants in the United States, Discussion Paper 03-15, Resources for the Future.
- Bye, B., T. Fæhn, T-R. Heggedal og L. M. Hatlen (2009): Teknologitviking, klima og virkemiddelbruk – Rapport til Utvalget for bærekraftig utvikling og klima, Vedlegg 2 i *NOU2009:16: Globale miljøutfordringer – norsk politikk. Hvordan bærekraftig utvikling og klima bedre kan ivaretas i offentlige beslutningsprosesser*, Finansdepartementet.
- Bye, B. og K. Jacobsen (2011): Restricted carbon emissions and directed R&D support; an applied general equilibrium analysis, *Energy Economics* 33: 543–555.
- Bye B., M. Klemetsen og A. Raknerud (2013): Can non-market regulation spur innovations in environmental technologies, Discussion paper 754, SSB. (*Revise and resubmit. Scand. J. of Economics*).
- Chakravorty U., A. Leach and M. Moreaux (2011), Would Hotelling Kill the Electric Car?, *Journal of Environmental Economics and Management* 61, p. 281-296.
- Chen, Y. og M. Schwartz (2013): Product Innovation Incentives: Monopoly vs. Competition, *Journal of Economics & Management Strategy*, 22(3): 513–528.
- Cohen, L. and Noll, R.G. (1991): The Technology Pork Barrell, Washington D.C: The Brookings Institution.
- Cohen, W. M., and D. A. Levinthal (1989): Innovation and learning: The two faces of R&D, *Economic Journal* 99 (September), 569-596
- Dasgupta P. og J. Stiglitz (1988): *Learning-by-Doing, Market Structure and Industrial and Trade Policies*, Oxford Economic Papers, 40(2), 246-268.
- David, M. og B. Sinclair-Desgagné (2005): Environmental regulation and the eco-industry. *Journal of Regulatory Economics* 28(2): 141-155.
- Dechezleprêtre A., R. Martin og M. Mohnen (2013): Knowledge spill-overs from clean and dirty technologies: A patent citation analysis, Working paper London School of Economics.
- Downing P. B. and L. J. White (1986): Innovation in Pollution Control, *Journal of Environmental Economics and Management* 13, pp. 18--29.
- Eggert, H. and M. Greaker (2014): Promoting Second Generation Biofuels: Does the First Generation Pave the Road?, *Energies* 7: 1-16
- Eide, V., S. E. Harsem, S. Kverndokk og B. Tennbakk (2013): Rebound, prebound og lock-in ved energieffektivisering i boliger: Kunnskapsstatus og virkemiddelanalyse , Thema Rapport 2013-42.

- Farrell, J. and G. Saloner (1986): Installed Base and Compatibility: Innovation, Product Preannouncements, and Predation. *American Economic Review* 76, p. 940-955.
- Fischer, C., M. Greaker og K. E. Rosendahl (2014): Robust Policies against Emission Leakage: The Case for Upstream Subsidies, CESifo Working Paper No. 4742.
- Fischer C., Greaker M. og K. E. Rosendahl (2015): Strategic technology policy as a supplement to renewable energy standards, *forthcoming* The Economics and Political Economy of Energy Subsidies eds. Jon Strand, MIT Press.
- Fischer, C. og R. Newell (2008): Environmental and technology policies for climate mitigation, *Journal of Environmental Economics and Management*, 55(2): 142-62.
- Fudenberg D. og J. Tirole (1983): Learning-by-Doing and Market Performance, *Bell Journal of Economics*, 14(2), 522-530.
- Futagami, K. og T. Iwaisako (2007): Dynamic analysis of patent policy in an endogenous growth model, *Journal of Economic Theory* 132: 306-334.
- Fæhn, T. og E. T. Isaksen (2014): The diffusion of climate technologies in the presence of commitment problems, kommer i *Energy Journal*.
- Gallagher K. S. og E. Muehlegger (2011): Giving green to get green: Incentives and consumer adoption of hybrid vehicle technology, *Journal of Environmental Economics and Management*, 61: 1-15.
- Gerlagh R. og W. Lise (2005): Carbon taxes: a drop in the ocean, or a drop that erodes the stone? The effect of carbon taxes on technological change, *Ecological Economics*, 54: 241-260.
- Gerlagh, R., S. Kverndokk og K. E. Rosendahl (2009): Optimal timing of climate change policy; Interaction between carbon taxes and innovation externalities, *Environmental and Resource Economics*, 43(3): 369-390
- Gerlagh, R., S. Kverndokk og K. E. Rosendahl (2014): The Optimal Time Path of Clean Energy R&D Policy When Patents Have Finite Lifetime, *Journal of Environmental Economics and Management*, 67(1): 2-19.
- Golombek R., M. Greaker, S., A. C. Kittelsen, og S. Gaure (2014): Promoting carbon capture and storage technologies in Europe: A case for green strategic policy?, kommer som CREE working paper.
- Golombek R., M. Greaker og M. Hoel (2010): Carbon Taxes and Innovation without Commitment, *The B.E. Journal of Economic Analysis and Policy* 10-1, Article 32.
- Golombek, R. and M. Hoel (2004). Unilateral Emission Reductions and Cross-country Technology Spill-overs. *Berkeley Electronic Press; Advances in Economic Analysis & Policy* 4(2): Article 3.
- Greaker M., T-R. Heggedahl og K. E. Rosendahl (2015). On the rational for redirecting R&D from emissions intensive technologies to zero emission technologies, kommer som CREE working paper.
- Greaker M. og C. Hagem (2013), Strategic Investment in climate friendly technologies: The impact of permit trade, *Environmental and Resource Economics* 591, p. 65-85
- Greaker M. og M. Hoel (2011): Incentives for Environmental R&D, CESifo Working Paper No. 3468

- Greaker M. og K. Midttømme (2014): Optimal Environmental Policy with Network Effects: Will Pigovian Taxation Lead to Excess Inertia?, CESifo Working Paper Series No. 4759 (*Revise and resubmit, J. Public Economics*).
- Greaker M. og L. Pade (2009): Optimal CO₂ abatement and technological change: Should emission taxes start high in order to spur R&D? *Climatic Change* 96: 335-355.
- Gustavsson, P., P. Hansson og L. Lundberg (1999): Technology, Resource Endowments and International Competitiveness, *European Economic Review* 43: 1501–1530.
- Hauge, K. (2014): Når Rasmus, Viljar og Egil skal investere i energieffektiv teknologi, *Samfunnsøkonomen*, 28(1): 27-37.
- Heggedahl, T-R. og K. Jacobsen (2011): Timing of innovation policies when carbon emissions are restricted: An applied general equilibrium analysis, *Resource and Energy Economics* 33 (2011) 913–937.
- Hensley, R., J. Newman og M. Rogers (2012): Battery technology charges ahead. *McKinsey Quarterly*.
- Hoffert, M. I., K. Caldeira, G. Benford, D. R. Criswell, C. Green, H. Herzog, A. K. Jain, H. S. Kheshgi, K. S. Lackner, J. S. Lewis, H. D. Lightfoot, W. Manheimer, J. C. Mankins, M. E. Mauel, L. J. Perkins, M. E. Schlesinger, T. Volk and T. M. L. Wigley (2002). Advanced Technology Paths to Global Climate Stability: Energy for a Greenhouse Planet. *Science* 298 (5595): 981--987.
- Holtmark, B. og A. Skonhoft (2014): The Norwegian support and subsidy policy for electric cars. Should it be adopted by other countries? *Environmental Science & Policy* 42: 160-168.
- Innstilling til Stortinget fra energi og miljøkomitéen (2011). Innst. 390 S
<https://www.stortinget.no/Global/pdf/Innstillinger/Stortinget/2011-2012/inns-201112-390.pdf>
- International Energy Agency, Experience Curves for Energy Technology Policy, OECD/IEA, Paris, France (2000).
- Iwaisako T. og K. Futagami (2003): Patent policy in an endogenous growth model, *Journal of Economics*, 78: 239–258.
- Jaffe A. B., R. G. Newell and R. N. Stavins (2003) “Technological change and the environment”, *Handbook of Environmental Economics*, Elsevier.
- Johnstone N., I. Hascic og D. Popp (2010): Renewable Energy Policies and Technological Innovation: Evidence Based on Patent Counts, *Environmental and Resource Economics* 45, p. 133-155
- Jones, C. I. (2002): *Introduction to Economic Growth*, Second edition, W. W. Norton & Company, New York and London.
- Jones C. I. og J. C. Williams (2000): Too Much of a Good Thing? The Economics of Investment in R&D, *Journal of Economic Growth*, 5(1): 65-85.
- Jung C., K. Krutilla and R. Boyd (1996): Incentives for Advanced Pollution Abatement Technology at the Industry Level: An Evaluation of Policy Alternatives, *Journal of Environmental Economics and Management* 30, pp. 95--111.
- Katz M. L. and C. Shapiro (1986). Technology adoption in the presence of network externalities. *Journal of Political Economy*, Vol. 94, No. 4 p. 822-841.

- Kverndokk, S., K. E. Rosendahl og T. Rutherford (2004): Climate policies and induced technological change: Which to choose, the carrot or the stick?, *Environmental and Resource Economics*, 27(1): 21-41.
- Kverndokk, S. og K. E. Rosendahl (2007): Climate policies and learning by doing: Impacts and timing of technology subsidies, *Resource and Energy Economics*, 29(1): 58-82.
- Kverndokk, S., E. Nævdal og L. Nøstbakken (2014): The Trade-off between Intra- and Intergenerational Equity in Climate Policy, *European Economic Review* 69: 40-58.
- Laffont, J.-J. and J. Tirole (1996). Pollution permits and compliance strategies. *Journal of Public Economics*, 62(1-2), p. 85-125.
- Lundvall, B-Å. (1992): National systems of innovation, Anthem Press.
- Mazzucato M. (2013): *The Entrepreneurial State*, Anthem Press.
- Meld. St. 13 (2014-15): *Ny utslippsforpliktelse for 2030 – en felles løsning med EU*, Det kongelige klima- og miljødepartement.
- Milliman og Prince (1989): Firm incentives to promote technological change in pollution control. *Journal of Environmental Economics and Management* 17: 247-265.
- Newell R. G. og N. E. Wilson (2005): Technology Prizes for Climate Change Mitigation, RFF Discussion paper 33.
- Nordhaus W.D. (2002): Modeling induced innovation in climate-change policy. I Grubler A., Nakicenovic N., Nordhaus W.D. (red.), *Modeling induced innovation in climate-change policy*. Resources for the Future Press: Washington DC, kapittel 9.
- Nordhaus W. D. (2009): The Perils of the Learning Model For Modeling Endogenous Technological Change, NBER Working Paper No. 14638.
- Perino, G. (2010): Technology diffusion with market power in the upstream industry. *Environmental and Resource Economics* 46(4): 403-428.
- Pigou, A. C. (1920): *The Economics of Welfare*. London: Macmillan.
- Popp, D. (2002): Induced Innovation and Energy Prices, *American Economic Review*, 92(1): 160-180.
- Popp D. (2004): ENTICE: endogenous technological change in the DICE model of global warming, *Journal of Environmental Economics and Management*, 48: 742-768.
- Popp D. (2006): ENTICE-BR: The effects of backstop technology R&D on climate policy models, *Energy Economics*, 28: 188-222
- Popp, D. og R. Newell (2012): Where does energy R&D come from? Examining crowding out from energy R&D, *Energy Economics*, 34(4): 980-991.
- Requate T. og W. Unhold (2003): Environmental policy incentives to adopt advanced abatement technology: Will the true ranking please stand up?, *European Economic Review*, 47: 125-146.
- Requate T. (2005): Timing and commitment of environmental policy, adoption of new technology, and repercussions on R&D. *Environmental and Resource Economics* 31: 175-189.
- Romer P.M. (1990): Endogenous Technological Change, *Journal of Political Economy*, 98(5): 71-102.
- Schumpeter (1934): *The Theory of Economic Development*, Transaction Publishers, London (2008 edition).

- Spence M. A. (1981): The learning curve and competition, *Bell Journal of Economics*, 12, p. 49-70.
- Teknisk Ukeblad (2014) ((TU)): Dette er de viktigste teknologiske milepælene på sokkelen, 14-7-2014
- Turner, K. (2013): "Rebound" Effects from Increased Energy Efficiency: A Time to Pause and Reflect, *The Energy Journal*, 34(4): 25-42.
- Witajewski-Baltvilks, J., E. Verdolini og T. Massimo (2015): Bending the Learning Curve, Manus 9.2.2015.