

FOKUS: FESTSKRIFT TIL ARNE MELCHIOR

Det globale grønne skiftet: Mer evolusjon enn revolusjon

Jan Fagerberg
Universitetet i Oslo, Norge

Sammendrag

FNs klimapanel har pekt på at utslippene av klimagasser må reduseres til null innen midten av dette århundre om vi skal ha håp om å unngå alvorlige skadevirkninger for natur og samfunn. Denne artikkelen analyserer prosessen fram mot nullutslipp, det globale grønne skiftet, og drivkreftene bak dette, inkludert politikkenes rolle. Siden 80 prosent av verdens klimagassutslipp kommer fra bruk av fossil energi, er overgangen fra et system basert på fossil energi til et drevet av fornybar energi spesielt viktig. Tre aspekter ved dette skiftet, som det fokuseres på i artikkelen, er massive økninger i produksjon av grønn elektrisitet, bruk av dette til erstatning for fossile brenslere i ulike deler av samfunnet, og forbedringer i infrastruktur som knytter disse sammen. Etter å ha analysert dynamikken i det grønne skiftet går artikkelen mer i dybden på hvordan noen sentrale teknologier i skiftet, nemlig solenergi, vindenergi, batterier og elektriske biler, har utviklet seg over tid, inkludert hvilken betydning holdninger, etterspørsel og politikk har hatt for hva som har skjedd. Til slutt reiser vi spørsmålet om hva man kan lære av dette.

Nøkkelord: grønt skifte • nullutslipp • fornybar energi • batterier • elbiler

Kontaktinformasjon: Jan Fagerberg, e-post: jan.fagerberg@tik.uio.no

©2023 Jan Fagerberg. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), allowing third parties to copy and redistribute the material in any medium or format and to remix, transform, and build upon the material for any purpose, even commercially, provided the original work is properly cited and states its license.

Citation: Fagerberg, J. (2023). Det globale grønne skiftet: Mer evolusjon enn revolusjon. *Internasjonal Politikk*, 81(3), 465–491. <http://doi.org/10.23865/intpol.v81.5656>

Innledning

Utslipp av klimagasser i atmosfæren fører til global oppvarming som, hvis det får fortsette, vil ha alvorlige negative effekter på natur, livsbetingelser og økonomi verden over, ikke minst i fattige land i Afrika og Asia. FNs klimapanel har derfor konkludert med at netto utslipp av klimagasser må være redusert til null mindre enn tre tiår fra nå av om man skal ha håp om å unngå de mest alvorlige negative skadevirkningene (IPPC, 2018). Siden mesteparten av klimagassutslippene kommer fra bruk av fossil energi til forskjellige formål, er utfasing av fossil energi – og innfasing av fornybar energi – av stor betydning for muligheten til å lykkes med dette.

Et skifte fra et system basert på fossil energi til et nullutslippssamfunn i verden som helhet, det vi her vil kalle «det globale grønne skiftet», vil nødvendigvis kreve radikale endringer i de fleste sektorer/industrier, i produksjon så vel som forbruk. Men forskning viser at det tar tid – som oftest lang tid – for nye, radikale løsninger å utvikle seg fra ide-stadiet til å bli tatt i alminnelig bruk (Fagerberg, 2004; Kline & Rosenberg, 1986), og dette gjelder også i energisektoren (Fouquet, 2016; Smil, 2016; Wilson, 2012). Et halvt hundreår eller mer er ikke uvanlig. Så lang tid har vi dessverre ikke, om vi skal ha håp om å unngå de mest alvorlige skadevirkningene.

Når det likevel kan være grunn for en viss optimisme, så er det fordi en del av de sentrale byggesteinene i det globale grønne skiftet passerte ide-stadiet for lenge siden. Vi starter med andre ord ikke på bar bakke. Det globale grønne skiftet må forstås som en evolusjonær prosess,¹ hvis utgangspunkt går langt tilbake i tid, og hvor mange aktører med ulike motiver har bidratt. Hvis man ønsker å påvirke overgangen til nullutslippssamfunnet, er det viktig å forstå drivkreftene i denne prosessen. Mange er opptatt av nye ideer og løsninger og prosesser som leder fram til dette, for eksempel forskning og utvikling. Men ut fra et evolusjonært perspektiv er det vel så viktig å forstå hva som bestemmer om de nye løsningene kommer i bruk, blir videreutviklet og forbedret, det vil si seleksjonsprosesser, og hvilken rolle ulike politiske grep spiller i denne forbindelse.

Etter først å ha diskutert dynamikken i det globale grønne skiftet mer i detalj, presenterer vi i artikkelens del tre en analyse av hvordan de sentrale teknologiene i det grønne skiftet har blitt til, og hvilken betydning blant annet holdninger, etterspørsel og politikk har hatt for hva som har skjedd. Til slutt reiser vi spørsmålet om hva man kan lære av dette, inkludert hva implikasjonene for politikk-utforming i Norge kan være.

¹ De sentrale prosessene ut fra et evolusjonært perspektiv er variasjon og seleksjon. Mens variasjon genererer ideer for hvordan menneskelige behov kan ivaretas, bestemmer seleksjon hvilke av disse nye ideene som slår igjennom. Både variasjon og seleksjon er derfor sentrale elementer i innovasjon, dvs. utprøving av nye ideer i praksis (Fagerberg, 2004). For en introduksjon til evolusjonær økonomisk teori, med særlig vekt på Schumpeters bidrag (og andre bidrag inspirert av hans perspektiv), se Fagerberg (2003).

Veien mot nullutslipp: Det grønne skiftet

Begrepet «grønt skifte» er mye brukt, men sjelden klart definert. Her vil vi definere det som et skifte fra et teknologisk, økonomisk og sosialt system basert på bruk av fossile brensler, tiltagende klima- og naturkrise og sløsing med ikke-fornybare ressurser, til et system hvor fossile brensler er erstattet av fornybar energi, den globale oppvarmingen er under kontroll, ressurser gjenbrukes og naturmangfoldet tas vare på. Det grønne skiftet er altså mer enn et energiskifte, men uten et skifte fra et fossilt energisystem til et system basert på fornybar energi, er et globalt grønt skifte utenkelig.

Så omfattende endringer som de vi snakker om i forbindelse med det globale grønne skiftet, er ikke dagligkost. Hvordan skal vi forstå et så omfattende skift i teknologiske, organisatoriske og sosiale forhold? Hva er drivkreftene, og hvordan kan de påvirkes? Dette har vært et viktig tema innenfor evolusjonær økonomi i mange år. Allerede Schumpeter, den sentrale teoretikeren innenfor den evolusjonære tilnærmingen til økonomi og samfunnsfag, var levende opptatt av dette. Han var særlig interessert i den rollen innovasjoner, spesielt radikale innovasjoner, spiller. Etter Schumpeters syn var det lite trolig at en spesifikk innovasjon, uansett hvor radikal den var, i seg selv kunne føre til omfattende samfunnsmessige endringer (Schumpeter, 1939). Derimot mente han at et knippe radikale innovasjoner, som gjensidig forsterket hverandre, kunne tenkes å ha slike effekter. Et spørsmål han ikke hadde noe godt svar på, men som ble diskutert i kjølevannet av hans publikasjoner om temaet, var hva det var som eventuelt kunne bidra til å knytte ulike innovasjonsprosesser sammen på denne måten.

På åttitallet lanserte to evolusjonære økonomer, Cristopher Freeman og Carlota Perez (Freeman & Perez, 1988), en ny teori om hvordan slike store, tekno-økonomiske skift utvikler seg.² Det sentrale elementet ifølge Freeman og Perez er nye innsatsfaktorer – såkalte *core factors* (eller kjerneelementer) – karakterisert av lave og fallende priser, nærmest ubegrenset tilgang, og svært brede anvendelsesområder.³ Når disse blir anvendt i andre deler av økonomien – såkalte *carrier branches* – muliggjør de spredning av nye radikale innovasjoner der, noe som kan lede til rask vekst i de berørte bransjene, strukturelle endringer i økonomien, og – som et resultat – enda raskere etterspørsel etter de nye innsatsfaktorene. Ett eksempel på en slik selvforsterkende prosess er ifølge Freeman og Perez da billig og rikelig olje og gass, i kombinasjon med andre radikale innovasjoner (f.eks. forbrenningsmotoren), revolusjonerte produksjonsprosessen i en lang rekke sentrale sektorer, som elektrisitetssektoren, transportsektoren, kjemisk industri, tekstilindustri og så videre, og la grunnlaget for store endringer i forbruksmønstre, bosettingsstruktur og levemåte (som i sin tur førte til økt etterspørsel etter olje og gass). Vi kan kalle denne prosessen, som satte sitt

² Se også Freeman og Louçã (2001) og Perez (2002, 2016).

³ En annen betegnelse for slike kjerneelementer er «general purpose technologies» (Helpman, 1988; Lipsey et al., 2005).

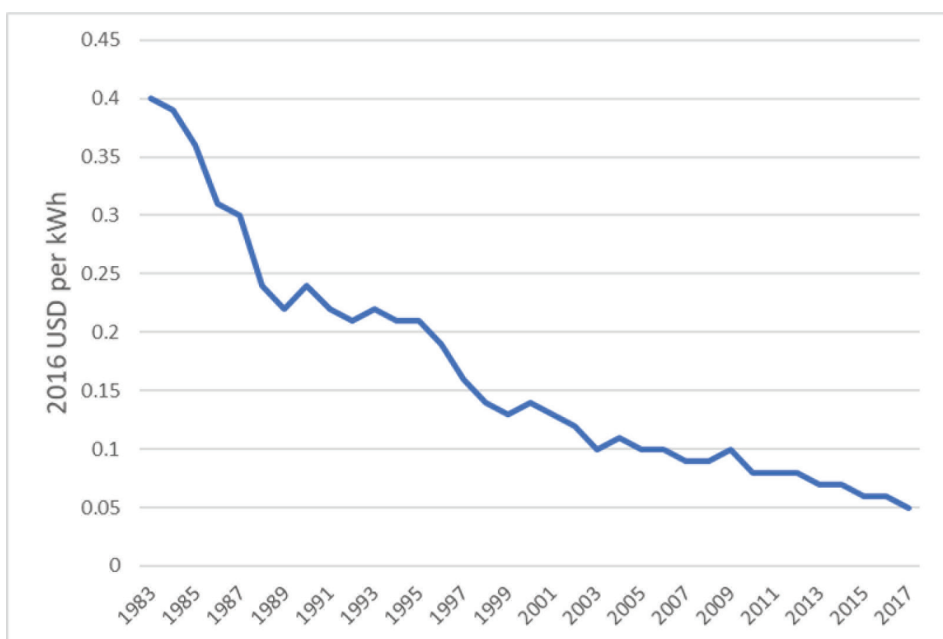
stempel på kapitalismens utvikling fra begynnelsen av 1900-tallet av og mange tiår framover, for det globale fossile skiftet. Et annet og nyere eksempel er ifølge Freeman og Perez hvordan innovasjoner i mikroelektronikk i andre halvdel av det tyvende århundre både revolusjonerte eksisterende industrier (kontorutstyr, telekommunikasjon) og ga støtet til nye forbruksmønstre, i en gjensidig selvforsterkende prosess som fortsatt pågår. Et sentralt poeng i Freeman og Perez' analyse er at så radikale økonomiske endringer krever – i tillegg til ny infrastruktur – også store endringer i samfunnet forøvrig (organisasjonsformer, politikk, institusjoner osv.).⁴ Manglende evne til å gjennomføre slike (komplementære) samfunnsmessige endringer kan ifølge Freeman og Perez hemme et lands økonomiske utvikling. De bruker betegnelsen *structural crisis of adjustment*, eller «omstillingkrise», for å beskrive de problemene dette kan medføre.

Freemans og Perez' analytiske tilnærming kan også brukes til å analysere det globale grønne skiftet (Mathews, 2013). Kjernen i det grønne skiftet er innovasjoner i fornybar energi, spesielt solenergi og vindenergi, som bare for noen tiår siden ble betraktet som altfor dyre teknologier av de fleste.⁵ Siden da har imidlertid kostnadene falt jevnt og trutt, som figur 1–2 viser, og sol- og vindenergi er i dag like rimelige – eller rimeligere – enn andre måter å produsere elektrisitet på i de fleste sammenhenger. Faktisk sank kostnaden ved å produsere elektrisitet fra landbasert vind med 88 prosent mellom 1983 og 2017. Tilsvarende tall for solenergi er enda mer imponerende, 98 prosent. På denne bakgrunn er det kanskje ikke så overraskende at den internasjonale energi-tenketanken IEA, inntil nylig sett som en pålitelig alliert av fossil- og kjernekraftindustriene, nå utroper solenergi til den nye «kongen av elektrisitetsproduksjon» (IEA, 2020).

I seg selv fører ikke innovasjonene i sol- og vindenergi, selv om resultatet er imponerende, til et grønt skifte. For at det skal skje må den grønne elektrisiteten som de fornybare teknologiene leverer, bli tatt i bruk i andre deler i økonomien (bruker-sektorer) og erstatte bruk av fossil energi der. Dette er en utvikling som er i god gang, men på ingen måte sluttført. Innen transportsektoren for eksempel, er batteridrevne elektromotorer i ferd med å erstatte forbrenningsmotoren som drivkraft, i første omgang i personbilmarkedet, men også i en viss grad for tyngre kjøretøyer, og etter hvert antakelig også for ferger (Bugge et al., 2022), kysttrafikk og fly på kortere ruter. Elektrisitet er også godt egnet til å erstatte fossile brenslers som kilde for produksjon av varme eller kulde i bygg og industrielle prosesser. Produksjon av ammoniakk og kunstgjødsel, for eksempel, som i dag framstilles

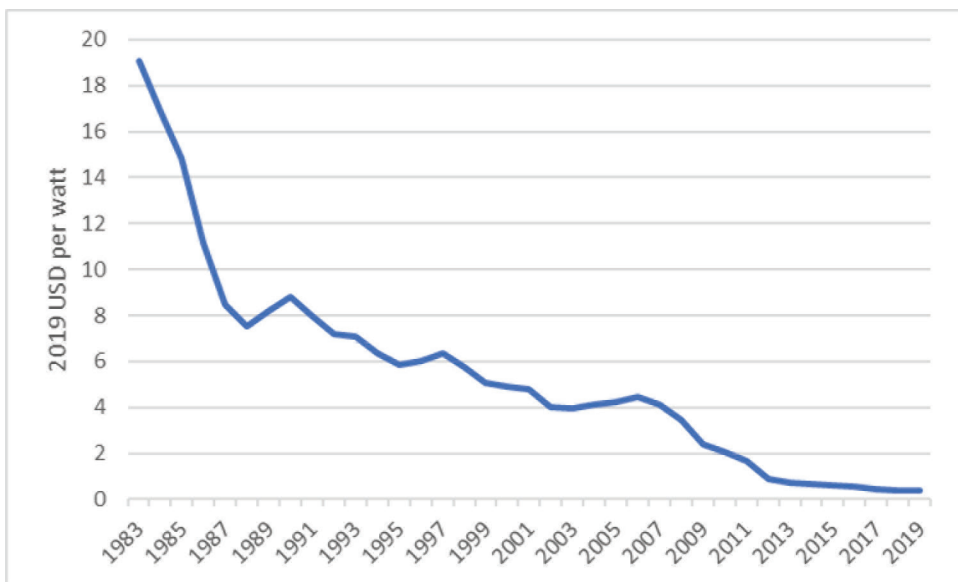
⁴ Freeman og Perez (1988, s. 49) bruker begrepet «tekno-økonomisk paradigme» for å beskrive sammenhengen mellom teknologiske, økonomiske, organisatoriske og institusjonelle forhold i en epoke.

⁵ De fleste former for fornybar energi har samme utgangspunkt, nemlig solen, som er opphavet for solenergi, vindenergi, bølgeenergi, vannkraft (regn), bioenergi osv. Fornybar energi er altså i all hovedsak ulike måter å «høste sol» på. Unntaket er geotermisk energi, som skyldes prosesser i jordens indre.



Figur 1. Elektrisitet fra landbasert vind: Kostnad (LCOE) per kilowatt-time, 1983–2017.

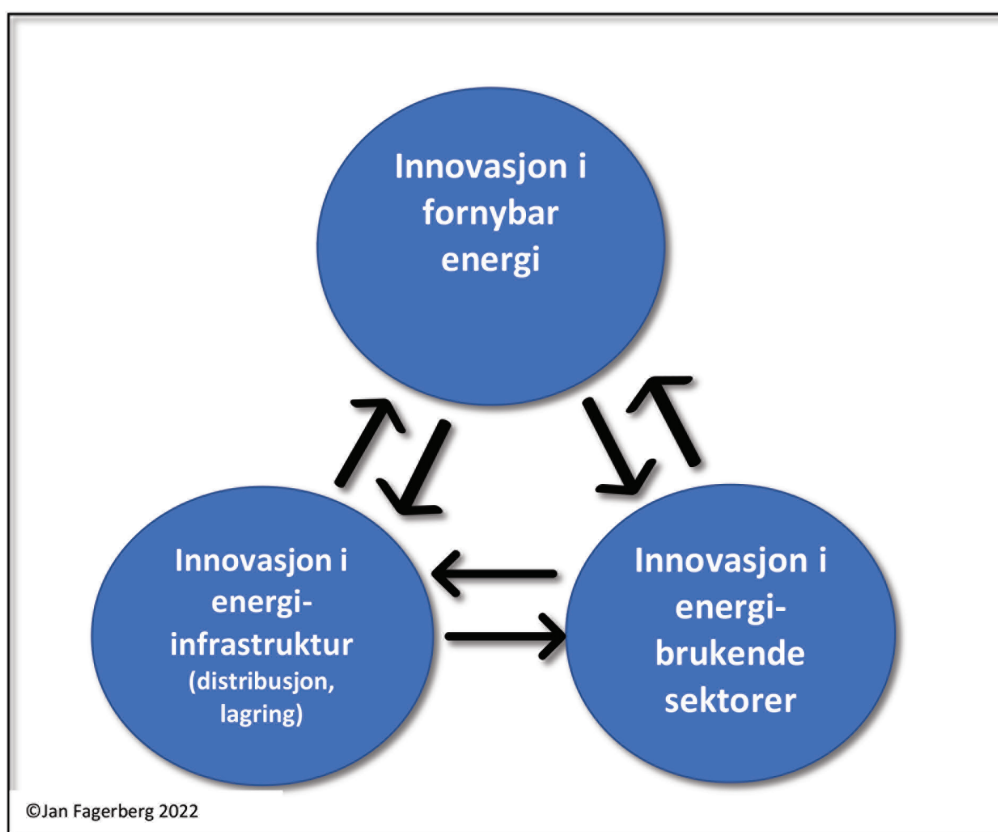
Note: Kostnad for produksjon av elektrisk kraft (LCOE), landbasert vind, hele verden (gjennomsnitt), i 2016 USD per kilowatt-time (kWh). Egne beregninger basert på data fra <https://ourworldindata.org/grapher/onshore-wind-lcoe>, lastet ned 15. februar 2022.



Figur 2. Solpaneler, pris per watt, 1983–2019.

Note: Solpaneler, pris per watt, i 2019 USD. Egne beregninger basert data fra <https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices>, lastet ned 15. februar 2022.

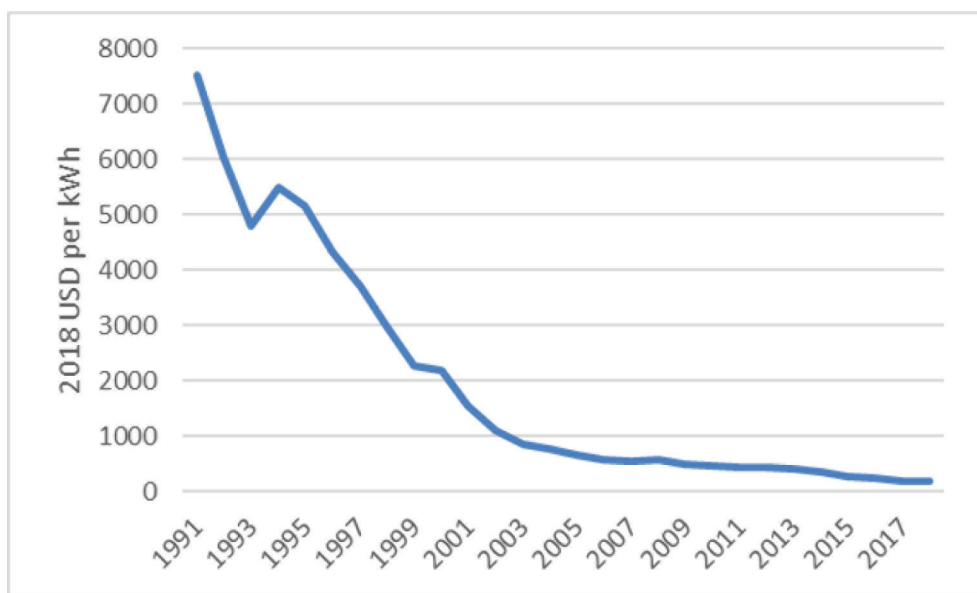
ved bruk av fossile brensler (som leder til karbonutslipp), kan også produseres gjennom å bruke elektrisitet (The Royal Society, 2020). Faktisk var det slik dette ble produsert i Norge i forrige århundre, inntil denne måten å gjøre det på ble utkonkurrert av produksjonsformer basert på bruk av store mengder billig fossil energi (med dertil hørende karbonutslipp, som man ikke la så mye vekt på den gangen). Dette eksemplet er ikke unikt. I mange tilfeller finnes det alternative produksjonsmetoder basert på bruk av elektrisitet i stedet for fossile brensler, metoder som ikke har blitt så mye brukt (og utviklet videre), fordi fossile brensler har vært så billige og allment tilgjengelige, og utslippene av klimagasser har vært gratis.



Figur 3. Drivkrefter i det grønne skiftet.

Figur 3 illustrerer noen av de sentrale drivkreftene i det globale grønne skiftet. Innovasjon i fornybar energi, karakterisert av synkende kostnader, med økt konkurransekraft og produksjon som følge, leder til at fornybar energi etter hvert fortrenger fossil energi som kilde for elektrisitetsproduksjon. Dette er i seg selv et vesentlig bidrag til det globale grønne skiftet, siden 40 prosent de totale klimagassutslippene

i dag kommer fra elektrisitetsproduksjon – 60 prosent av verdens elektrisitetsproduksjon skjer i dag ved å brenne fossile brensler. Den stadig mer konkurransedyktige grønne elektrisiteten muliggjør også innovasjon i energibrukende sektorer, som introduksjon av nye metoder for drift av maskiner, oppvarming, kjøling, industrielle prosesser og så videre, hvor grønn elektrisitet erstatter fossil energi. Dette leder igjen til økt etterspørsel etter grønn elektrisitet verden over. Men det nye grønne energiregimet avhenger også av innovasjoner i det vi kan kalle energi-infrastruktur, som nye løsninger, teknologiske så vel som organisatoriske, for distribusjon og lagring av energi. For eksempel ville elektrifiseringen av transportsektoren ikke latt seg gjennomføre uten framskrittene i batteriteknologi de siste tiårene, basert på innovasjoner i litium-ion-teknologi, som – i interaksjon med økt etterspørsel for batterier til elektriske kjøretøyer – har bidratt til en kostnadsnedgang helt på linje med hva vi har sett for solenergi (figur 4). Batterier spiller ikke bare en viktig rolle i det grønne skiftet i transportnæringen, de vil kunne bidra til å gjøre elektrisitetsforsyningen mer stabil, noe som det vil bli et økende behov for etter hvert som elektrisitetsproduksjonen i de fleste land blir mer avhengig av produksjonsformer som svinger med værforholdene og tid på døgnet.



Figur 4. Pris på litium-ion-celler, per kilowatt-time, 1991–2017.

Note: Pris på litium-ion celler (alle typer), per kilowatt-time i 2018 USD. Egne beregninger basert på data fra Ziegler et al. (2021a, 2021b).

Hovedlinjen i det globale grønne skiftet er massive økninger i grønn elektrisitetsproduksjon og elektrifisering i sektorer som bruker energi. Elektrifisering er en fullt ut realistisk strategi i de fleste sammenhenger. Det vil også føre til lavere energiforbruk

i verden som helhet, siden elektromotorer har langt høyere energieffektivitet enn maskiner drevet av fossil energi. I noen tilfeller er imidlertid direkte elektrifisering vanskelig, som for eksempel i internasjonal luftfart og shipping, og enkelte tungindustrier, blant annet stål og sement. Disse «vanskelig elektrifiserbare» aktivitetene står til sammen for ca 15 prosent av de globale klimagassutslippene. I disse tilfellene vil det være behov for å finne nye løsninger, det vil si innovasjon, og det vil være en viktig oppgave for innovasjonspolitikken å støtte opp om dette. Antagelig vil det ikke være mulig å finne en «kvikkfiks» som passer i alle tilfeller, det kan behøves ulike strategier for å nå nullutslipp i forskjellige sektorer. I noen tilfeller, som i stål- og sementindustri, vil økt gjenbruk og økt bruk av andre materialer kunne bidra til vesentlige utslippsreduksjoner. Men det utelukker ikke at en radikal omlegging av produksjonsprosessen (gjennom prosessinnovasjon) også vil bli nødvendig. Det som er sikkert er at det i mange tilfeller ikke er opplagt i dag hva som er den beste løsningen, at det derfor som regel vil være klokt – også i innretningen av innovasjonspolitikken (Fagerberg, 2018) – å eksperimentere med ulike løsninger, prøve disse ut i praksis, og vente med å trekke altfor bastante konklusjoner til man har fått nødvendig erfaring.

Et eksempel på dette kan være usikkerheten om hvilken rolle hydrogen vil spille i det globale grønne skiftet. Hydrogen er en brennbar gass som kan brukes til mye av det samme som fossile brenslers, og som ikke fører til utslipp av klimagasser når den brennes. Potensielt kan hydrogen derfor spille en stor rolle i det grønne skiftet, blant annet som drivstoff, i produksjon av varme og kulde, i industrielle prosesser og som et bidrag til å stabilisere elektrisitetsforsyningen (siden hydrogen kan lagres, selv om det krever stor plass). Hydrogen er også det mest alminnelige grunnstoffet som finnes, så tilgjengeligheten er overhodet ikke noe problem. Det vanligste i dag er å framstille det fra naturgass, såkalt «grått» hydrogen, vesentlig for bruk i industrielle prosesser. Men dette fører til utslipp av klimagasser, så hvis hydrogen fra naturgass skal bidra til det grønne skiftet, må disse utslippene fanges og lagres sikkert, noe som er både krevende og kostbart (såkalt blått hydrogen). Alternativt kan hydrogen framstilles ved å spalte vann, som består av hydrogen og oksygen, ved hjelp av grønn elektrisitet, såkalt grønt hydrogen. Det er i dag en dyr produksjonsmetode, men etter hvert som produksjonen øker, er det antatt at kostnadene vil synke, slik at det på lengre sikt vil bli den rimeligste løsningen (IEA, 2021). Men bruk av elektrisitet til å produsere hydrogen innebærer et betydelig energitap. Det vil derfor alltid være mer regningssvarende å bruke elektrisitet direkte, hvis det er mulig, framfor indirekte i form av hydrogen (produsert ved hjelp av elektrisitet). Dette er en viktig årsak til at hydrogendrevne biler aldri har slått helt an. For eksempel, i 2015 lanserte det japanske Toyota-konsernet – en ivrig pådriver for hydrogendrevne biler – modellen Mirai, drevet av hydrogen, med langt bedre rekkevidde enn samtidige elbiler. På tross av dette har Toyota siden lanseringen bare solgt noen få tusen i biler i året. Til sammenligning økte det globale salget av elbiler i samme periode fra under en million i 2015 til nær 9 millioner

i 2021⁶ Noen mener at hydrogen kan være mer velegnet for tyngre kjøretøyer, som busser og lastebiler, men det kan ikke utelukkes at batteridrift, på grunn av lavere kostnader, blir det primære valget også i disse tilfellene (Stinson, 2022; Timperley, 2021).

Usikkerheten knyttet til framtidig bruk av hydrogen illustrerer et viktig poeng ved innovasjon. En teknologi, uansett hvor lovende den er, vil bare slå igjennom hvis den gir et bedre (billigere) resultat enn alternativene. Det er dette som i evolusjonær teori kalles seleksjon, og som spiller en hovedrolle i innovasjonsprosesser. For eksempel kan hydrogen erstatte naturgass som oppvarmingskilde i bygninger. Men det kan også elektrisk oppvarming kombinert med varmepumper, som har vært gjennom en rivende utvikling i senere år, og antagelig vil være en rimeligere løsning i de fleste sammenhenger.⁷ Hydrogen kan også brukes til energilagring, men det kan også batterier, en annen teknologi i rask framgang, og med bedre energiøkonomiske egenskaper. Det betyr likevel ikke at det ikke finnes anvendelsesområder hvor hydrogen kan komme til å spille en rolle framover. I tillegg til industrielle prosesser, hvor det allerede er et marked for hydrogen, er de to mest aktuelle områdene maritim sektor og luftfarten. I begge tilfeller er det forventet at batteridrift vil kunne bli et alternativ på kortere avstander, men at andre typer drivstoff (med nullutslipp) vil måtte erstatte fossilt brensel på lengre avstander. Det pågår allerede en god del eksperimenter – innovasjon – for å lære mer om hva som vil være mest hensiktsmessig i de ulike tilfellene. Hydrogen er et av alternativene, men gassen har et veldig stort volum, som kan gjør den mindre egnet. I likhet med naturgass kan hydrogen komprimeres gjennom nedkjøling, men det er en kostbar og energikrevende prosess. Hydrogen kan også kombineres med andre stoffer til nye gasser eller væsker som er lettere å transportere og utnytte. En mulighet som det ofte pekes på, er ammoniakk, en kombinasjon av hydrogen og nitrogen. Fordelen er blant annet at det allerede finnes etablerte internasjonale transport- og forsyningskjeder for dette (ammoniakk brukes i dag blant annet som råstoff for kunstgjødsel). Hydrogen kan også kombineres med karbon til gasser eller væsker som kjemisk er identiske med fossile brenslere som brukes i dag, som metan, metanol eller flybensin, men hvis dette skal være forenelig med nullutslipp, må karbonet enten stamme fra biologiske prosesser (som binder karbon fra atmosfæren) eller høstes fra atmosfæren på annen måte (f.eks. gjennom såkalt *direct air capture*, DAC, som i dag er svært dyrt). Et alternativ til hydrogenbasert drivstoff, spesielt i luftfarten, er drivstoff utstuvnet fra biologisk materiale. Dette skjer allerede i en viss utstrekning, men problemet har

⁶ IEA (2022a). Dette hadde nær sammenheng utviklingen i batteri-teknologi i perioden (se figur 4).

⁷ Hydrogen til oppvarming i bygninger kan likevel bli aktuelt i tilfeller hvor det allerede foreligger en utbygget infrastruktur for gassdistribusjon (og som kan anvendes til hydrogendistribusjon uten store, nye investeringer). Det kan også være et alternativ i områder med stort underskudd på grønn elektrisitet, og uten muligheter for å enten å produsere dette selv, eller importere det via kabler.

vært at områder som er velegnet for å produsere biologisk materiale til produksjon av biodrivstoff, som regel også er velegnet for å produsere mat til en økende befolkning. Så dersom biodrivstoff skal være bærekraftig, må man finne måter å produsere det på som ikke kommer i konflikt med matproduksjon. Det er derfor knyttet betydelig usikkerhet til i hvilken grad produksjonen av biodrivstoff kan skaleres opp for å møte behovet for nullutslippsdrivstoff, og hva kostnadene i så fall vil bli.

Hvordan det grønne skiftet ble til

I det følgende skal vi gå nærmere inn på hvordan noen av de mest sentrale elementene i det globale grønne skiftet har blitt til, med særlig vekt på kjerneteknologiene i det grønne skiftet, vindkraft og solenergi. I tillegg har vi valgt å inkludere en energibrukende sektor, elektriske biler, og en nært forbundet infrastruktur-teknologi, batterier.

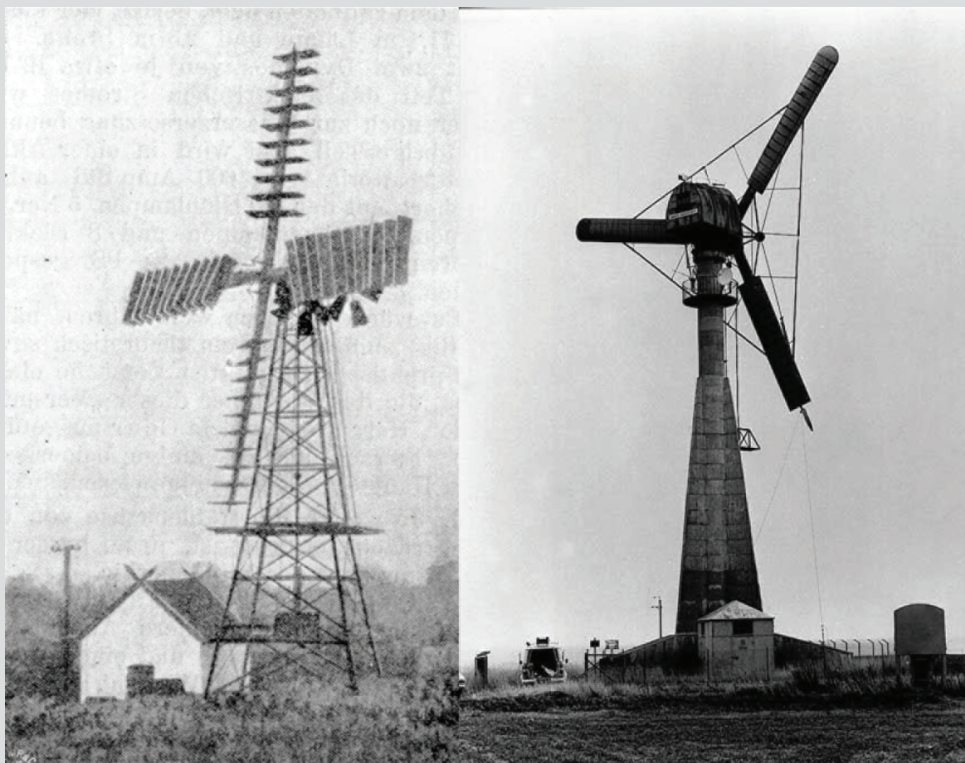
Vind og sol

Vindmøller har vært brukt til å produsere energi for forskjellige formål i tusener av år, og da muligheten bød seg, må tanken om å bruke vindmøller til å produsere elektrisitet ha vært nærliggende. I hvert fall var det i elektrisitetens barndom forsøk i flere land på å gjøre denne ideen til virkelighet. Interessen var spesielt stor på landsbygda, på gårder og steder hvor elektrisitetsnettene ikke var så godt utbygd. I løpet av første halvpart av forrige århundre ble vindmøller som produserte elektrisitet, gjerne kombinert med batterier, ganske vanlig på landsbygda i flere land, blant annet i USA, Australia og Danmark, og det var flere firmaer som produserte og markedsførte vindmøller laget for dette formålet («History of windpower», 2023). Etter hvert som elektrisitetsnettene ble bedre utbygd og billige fossile brensler ble allment tilgjengelige, gikk imidlertid slike vindmøller ut av bruk de fleste steder.

Boks 1. Danske vindkraft-pionerer

I årene rundt 1900 drev den danske høyskolelæreren Poul la Cour, med økonomisk støtte fra den danske stat, det som antagelig var verdens første forsknings- og utviklingsprosjekt om elektrisitetsproduserende vindmøller. I tillegg til å utvikle vindmøller (figur 5), startet han en forening og et tidsskrift for vind-elektrisitet, organiserte en utdanning for vind-elektrikere og bidro med råd og dåd om elektrifisering og installasjon av vindmøller (Nielsen, 2018). Mens la Cours visjon var et desentralisert system av vindmøller som leverte svakstrøm for lokale behov, gikk utviklingen av elektrisitetsforsyningen i Danmark etter hvert i retning av bruk av fossile brensler, sentraliserte systemer og sterkstrøm. Det ble imidlertid snart klart, ikke minst på grunn av erfaringene under andre verdenskrig, at et energisystem basert utelukkende på fossile brensler kunne være ganske

sårbart. En av la Cours studenter, Johannes Juul, foreslo derfor å supplere med vindkraft, og fikk støtte til å bygge en prototype-vindmølle som kunne levere elektrisitet til nettet. Det ble lagt særlig vekt på å utvikle et robust design som kunne tåle barske værforhold. Vindmøllen sto ferdig i 1957 og leverte vekselstrøm til nettet uten vedlikehold i elleve år. Men allerede etter noen år bestemte de danske elektrisitetsverkenes forening seg for ikke å gå videre med vindkraft, på grunn av rikelig tilgang på billige fossile brensler (vindkraft ble sett på som for dyrt i sammenligning), og fordi kjernekraft ble vurdert som mer lovende enn vindkraft på lengre sikt. Juuls anstrengelser var likevel ikke helt forgjeves, for det var hans design som – via dansk vindkraftindustri senere suksess – skulle komme til å ligge til grunn for moderne vindturbiner.



Figur 5. La Cours vindmølle, Vallekilde, ca. 1905, til venstre og Juuls vindmølle, Gedser, 1957, til høyre.

Kilder: Elektrotechnische Zeitschrift 1907, s. 902; <http://www.windpower.org/da/pictures/juul.htm>

På begynnelsen 1970-tallet var vindmøller som produserte elektrisitet i beste fall en kuriositet. Men i årene som fulgte økte interessen for fornybar energi i mange land. Det hang blant annet sammen med oljekrisene på sytti- og åttitallet (OPECs

oljeembargo av vestlige land) som gjorde det klart for all verden hvor sårbart et energisystem basert på (importerte) fossile energikilder kunne være. Som en følge av dette satte flere land i gang forsknings- og utviklingsaktiviteter knyttet til alternative energikilder. Selv om mye av dette gikk til kjernekraft, førte det også til økt satsing på ulike former fornybar energi, spesielt vindkraft og solenergi. Den økte interessen for fornybar energi hang også sammen med økt miljøbevissthet i befolkningen fra 1970-tallet av. Skepsisen til sentraliserte modeller for energiforsyning, med kjernekraft som et sentralt element, var utbredt. Mange, blant annet i Danmark, Tyskland, og USA, ønsket seg et mer desentralisert system, fritt for forurensningsproblemer og fare for radioaktive utslipp, og med mer lokal innflytelse (Morris & Jungjohann, 2016). Fornybar energi fra vind og sol kom til å passe som hånd i hanske med dette.

Den moderne vindkraftindustrien startet med entusiaster, ofte organisert gjennom en egen forening, som ønsket å bygge sine egne elektrisitetsproduserende vindmøller. Etter hvert kom det også produsenter på banen, enten gjennom oppstartsselskaper (som tyske Enercon), eller ved at bedrifter i andre bransjer diversifiserte som virksomhet (som danske Vestas, opprinnelig en produsent av landbruksmaskiner). Danske aktører ble tidlig blant de ledende i bransjen (Karnøe, 1991). For eksempel hadde danske produsenter to tredeler av markedet for vindturbiner i California på første halvpart av 1980-tallet, da generøse støttetiltak der i disse årene førte til et rush av installasjoner (Karnøe & Garud, 2012).⁸ De danske produsentene bygget videre på Juuls robuste design (boks 1), noe som førte til at de danske vindmøllene gjennomgående klarte hardt vær bedre enn konkurrentene, og bidro til å gi danske vindmøller et godt omdømme.⁹ Danske myndigheter støttet opp om den

⁸ Også i USA var det, gjennom et initiativ fra Carter-administrasjonen (PURPA i 1978), blitt åpnet for at små elektrisitetsprodusenter kunne selge eventuell overproduksjon til nettet, med en pris basert på hva de store elektrisitetsleverandørene sparte ved å ta imot denne overskuddskraften. I praksis ble dette bestemt av oljeprisen. Da dette skulle implementeres i California midt på åttitallet, ble det lagt vekt på at det ville være bedre for investeringsvilligheten i ny, fornybar energi, om prisen for overskuddskraften var bestemt på forhånd for flere år framover. Siden det var en alminnelig antagelse at oljeprisene ville stige framover, ble det bakt inn en årlig prisøkning på overskuddsstrømmen på 7 prosent per år i kontraktene. Siden oljeprisen tvert om falt kraftig i årene som fulgte, gjorde dette det veldig lønnsomt å installere vindmøller og levere kraft til nettet. Dette bidro vesentlig til den kraftige boomen i vindmøller i California på første halvpart av åttitallet (Nemet, 2019, s. 76–77).

⁹ I flere land, blant annet USA og Tyskland, ble det på sytti- og åttitallet satt i gang offentlig finansierte forsknings- og utviklings-initiativer som hadde som formål å utvikle langt større og – ble det antatt – mer kostnadseffektive vindturbiner enn de danske. Eksempler er det tyske Growian-prosjektet og MOD-turbinene i USA. Disse initiativene mislyktes imidlertid, da turbinene rett og slett blåste i filler. Det var i stedet de solide, men mindre, danske modellene som skulle komme til å bli utgangspunktet for den videre utviklingen i bransjen. Se Karnøe (1991) og Morris og Jungjohann (2016).

gryende næringen blant annet ved å finansiere et testsenter for vindkraftsteknologi (på Risø), og gjennom subsidier til kjøp og installasjon av vindmøller, som måtte være sertifisert av Risø-senteret for å sikre at de kvalitetsmessig holdt mål. Men på tross av dette var manglende etterspørsel et vedvarende problem i den nye næringen, og flere aktører opplevde finansielle problemer. En vesentlig årsak til dette, ble det hevdet fra bransjehold, var at lønnsomheten ved å installere vindmøller ble kraftig redusert fordi eiere ikke kunne levere overskuddskraft til elektrisitetsnettet, og få betalt for dette på linje med andre elektrisitetsprodusenter. For å bøte på dette ble det i 1984 innført en ny ordning – en såkalt *feed-in tariff* (FIT) – i Danmark som gjorde dette mulig. Denne ordningen, i kombinasjon med andre tiltak for å stimulere etterspørselen, bidro vesentlig til å øke takten i utbyggingen av vindkraft i Danmark i årene som fulgte. Lignende ordninger ble også etter hvert innført i flere andre land, blant annet i Tyskland, som i årene som fulgte skulle komme til å bli det viktigste markedet i verden for sol- og vindenergi.

Boks 2. Solkraft

At lys kan produsere elektrisitet via et passende medium, har vært kjent i nær to hundre år, lenge før Albert Einstein i 1905 publiserte en forklaring av hvorfor det var slik (som han senere fikk nobelprisen for). Charles Fritts utviklet den første fungerende solcelle med selen som medium i 1884 i New York. Virkningsgraden var imidlertid lav, bare rundt én prosent. Den kjente tyske ingeniøren og industrilederen Werner Siemens spådde imidlertid oppfinnelsen en lysende framtid, siden «tilbudet av solenergi er både ubegrenset og gratis», som han uttrykte det (Siemens, 1885). Etter århundreskiftet hadde Siemens-konsernet store planer om å installere solcelleanlegg (med kobber som medium) i Nord Afrika og føre elektrisiteten til Europa via kabel, men det ble med planene (Nemet, 2019). Stafettpinnen ble overtatt av Bell Labs i USA, som i 1954 presenterte en solcelle med seks prosents effektivitet, med silisium – som allerede var i bruk i den nye IT-industrien – som medium. I løpet av de nesten sytti årene som har gått har effektiviteten av solceller basert på dette dominerende silisium-baserte designet blitt mer enn tredoblet, samtidig som kostnaden har falt til en brøkdel av hva den opprinnelig var (figur 2). I dag er solkraft regnet som den rimeligste måten å produsere elektrisitet på i de fleste sammenhenger (IEA, 2020).

Utfordringen for solceller, som alle nye teknologier, var å finne en anvendelse de var egnet for. Siden kostnadene i begynnelsen var skyhøye (figur 2), sa det seg selv at de bare kunne være aktuelle for formål hvor det ikke fantes noen annen måte å levere elektrisitet på. Eksempler ble satellitter (figur 6), navigasjonsinstrumenter, og etter hvert – vesentlig fra japanske produsenter – bærbar elektronikk, som kalkulatorer.



Figur 6. Vanguard 6, 1958, den første satellitten med solceller.

Kilde: NASA

Den amerikanske presidenten Richard Nixon lanserte på 1970 tallet *Project Independence*, som var en reaksjon den sårbarheten som USAs avhengighet av fossil energi fra Midtøsten utgjorde. Som ledd i dette ble det en tid satset friskt på å videreutvikle solenergi-teknologien, blant annet gjennom forskings- og utviklingsprogrammer og en offensiv statlig innkjøpspolitikk. Men satsingen avtok raskt etter at Ronald Reagan, som mente dette heller burde være en oppgave for private, avløste Jimmy Carter som president, og prisene på fossil energi falt kraftig på midten av 1980-tallet.

USA var imidlertid ikke alene om å satse på solenergi. Japan hadde også dedikerte forskings- og utviklingsprogrammer rettet inn mot denne teknologien, og satset enda mer enn USA på å utvikle nye sivile anvendelser, særlig i form av solpaneler. I løpet av en tiårsperiode fra midten av 1990-tallet og framover ble det installert over 200 000 solpanelanlegg på japanske tak med økonomisk støtte fra staten. Myndighetene antok at produktiviteten i bransjen ville øke, og kostnadene falle, etter hvert som produksjonen (og antall installerte solpaneler) økte. Støtten til kjøp og installasjon av solpaneler ble derfor utformet slik at den var størst de første årene, og så avtok år for år, inntil programmet ble avsluttet midt

på 2000-tallet. Da hadde det også rukket å møte økende motstand fra etablerte energiaktører, blant annet innen kjernekraft, som begynte å se den voksende elektrisitetsproduksjonen fra solkraft som en mulig trussel mot deres egen forretningsmodell. Men solpanelprogrammet ble godt mottatt av allmennheten. For eksempel oversteg antallet som ønsket å installere solpaneler det antallet som det var budsjettert med flere ganger. Og politikken virket etter hensikten; prisen på kjøp og installasjon av solpaneler ble redusert med to tredjedeler i løpet av perioden, selv om solkraft fortsatt ikke var konkurransedyktig på pris med elektrisitet fra andre kilder (Nemet, 2019, s. 100). En annen effekt var at japanske bedrifter som Sharp etterhvert overtok for de amerikanske som ledende aktører i bransjen.

Utviklingen i Tyskland fram mot århundreskiftet minner på sett og vis om Danmark, selv om frontene mellom det etablerte energisystemets forsvarere og de som ønsket å gå i retning av fornybart var skarpere. Dette hang blant annet sammen med kjernekraftens sentrale posisjon i det tyske energisystemet. Som i Danmark økte interessen for vindkraft fra syttitallet av, spesielt på landsbygda, og blant de mange som ønsket et alternativ til det sentraliserte, kjernekraftbaserte systemet. Manglende mulighet for eiere av lokale kraftanlegg til å selge eventuell overskuddskraft via el-nettet var, som i Danmark, lenge et hinder, men denne muligheten kom på plass i 1990 gjennom et vedtak i det tyske parlamentet. Dette representerte en viktig stimulans for vindenergi, som gradvis ble mer konkurransedyktig sammenlignet med andre måter å produsere elektrisitet på. Men det var utilstrekkelig hvis formålet også var å støtte andre, mer umodne teknologier, som solkraft.

I 2000 innførte en ny regjering av sosialdemokratiet og de grønne en reform av støtteordningene for fornybar energi. Mens de bygget videre på systemet med en *feed-in tariff* (FIT), ble denne ikke fastsatt på grunnlag av hva de etablerte leverandørene «sparte» eller hva elektrisitetsprisen var, men hva det faktisk kostet å produsere elektrisitet med de ulike teknologiene, med et lite tillegg for en «normal» fortjeneste. Tariffen lå fast i ti år, som ga stor forutsigbarhet og sikkerhet for både eiere og långivere, og bidro vesentlig til den kraftige veksten i andelen fornybar elektrisitet i årene som fulgte. Som i Japan noen år før (se boks 2), ble det antatt at etter hvert som produksjonen økte, ville kostnadene avta, slik at nye kohorter av prosjekter kunne klare seg med lavere støtte. Å fastsette nivået på støtten,¹⁰ og hvor mye man skulle redusere det med hvert år (på grunn av antatt teknologisk framgang), var blant de mer krevende aspektene ved ordningen. Den store fordelene med det nye støttesystemet var at man

¹⁰ I løpet av de senere år har myndighetene i Tyskland, Danmark og andre land i økende grad gått over til å fastsette nivået på støtten gjennom auksjoner (Fagerberg, 2022). Dette gjelder særlig for havvind, som er en langt mer kapitalintensiv produksjonsform, og hvor aktørene gjennomgående er større virksomheter. Vi vil av plasshensyn ikke gå nærmere inn på denne utviklingen her.

unngikk å låse teknologivalget til hva som tilfeldigvis var billigst på et eller annet tidspunkt, men tillot ulike teknologiske løsninger å utvikle seg over tid, og konkurrere om å bli best og billigst. Dette skulle vise seg å bli spesielt viktig i tilfellet solenergi, som var svært dyrt i utgangspunktet, men som til slutt, sammen med landbasert vind, skulle vise seg å bli den billigste måten å produsere elektrisitet på.

Den tyske politikken på dette området – det såkalte *Energiewende* – klarte gjennom å stimulere etterspørselen for fornybare løsninger å gjøre både vind- og solkraft konkurransedyktig med andre måter å produsere elektrisitet på. Dette gjelder selv om man ikke tar hensyn til de alvorlige negative miljøkonsekvensene av å bruke fossil energi til å produsere elektrisitet. Satsingen på solenergi førte også til at det vokste fram en betydelig tysk industri knyttet til solcelleteknologi. Blant annet solgte tyske bedrifter etter hvert nøkkelferdige produksjonsanlegg til hele verden. Men dette gjorde det også mulig for produsenter i lavkost-land – først og fremst Kina – å etablere seg i den nye bransjen, i utgangspunktet for eksport til det raskt voksende tyske markedet, men etter hvert også til hjemmemarkedet og andre markeder verden over. Dette skjedde i stor grad på bekostning av tyske bedrifter, som opplevde økende problemer. I dag er Kina det viktigste markedet for solcellepaneler, og kinesiske produsenter har overtatt for de tyske og japanske som de ledende i bransjen.

Batteridrevne biler

Mange tenker på elektriske biler som noe nytt, men det faktiske forhold er at biler med elektromotorer var vanlige lenge før biler med forbrenningsmotorer. For eksempel var det flere elektriske biler enn biler med forbrenningsmotor i USA rundt 1900. En entusiastisk pådriver for elektriske biler var oppfinneren Thomas Edison, her avbildet med en elektrisk bil i 1913 (figur 7).

Elektriske biler hadde mange fordeler: De var stillegående, slapp ikke ut eksos, og de var enkle å bruke. Datidens bensindrevne biler, derimot, bråkete, forurenset og måtte sveives i gang, og man måtte gire i ett sett. Ikke rart at mange foretrakk elbiler. Men bensindrevne biler hadde et vesentlig fortrinn: lengre rekkevidde, noe som ble viktigere etter hvert som det ble bygget flere, lengre og bedre veier. Bensindrevne biler ble også lettere å bruke etter hvert som tiden gikk, gjennom forskjellige innovasjoner, selvstarter og automatgir for eksempel, og de var også rimeligere i innkjøp enn elbiler. Denne prisforskjellen ble bare større etter hvert, etter at masseproduksjonen av bensinbiler – som Henry Ford ga støtet til – kom igang. Batteribilene ble rett og slett utkonkurrert både på pris og ytelse, og de fleste produsentene av elektriske kjøretøyer la derfor ned virksomheten i løpet av de første tiårene av forrige århundre.

Oppladbare blybatterier ble tilgjengelige i siste halvpart av 1800-tallet, og det var disse som gjorde elektriske biler mulig. Batteriene var imidlertid dyre og tunge, og rekkevidden var heller ikke mye å skryte av – rundt 100 kilometer på det meste. Edison var klar over dette problemet og satset på å utvikle en ny type (alkalisk) batteri som han mente ville være bedre egnet. Men det viste seg i praksis at disse



Figur 7. Thomas Edison med en elektrisk bil i 1913.

Kilde: National Museum of American History

hadde en tendens til å lekke, og rekkevidden var fortsatt langt unna de bensindrevne konkurrentene. Dessuten bidro den nye batteritypen til å gjøre elektriske biler enda dyrere sammenlignet med bensinbiler. Etter hvert ble lekkasjeproblemene til de nye batteriene løst,¹¹ men da hadde bensinbilene allerede blitt dominerende i personbilmarkedet. Batteridrevne kjøretøyer forsvant likevel ikke fullstendig, de ble fortsatt brukt inne i bygninger (der spredning av kullos, CO, ikke er noen god ide), og for enkelte andre formål hvor kort rekkevidde ikke var sett som noen stor hindring.

Når interessen for elbiler økte i flere land på 1980- og 1990-tallet, skyldtes det ikke først og fremst noe stort gjennombrudd i batteriteknologien, men at elbilens fordeler med hensyn til støy og forurensning ble verdsatt høyere. Den amerikanske delstaten Californias såkalte «nullutslippspolitik» på begynnelsen av nittitallet, karakterisert av ambisiøse målsettinger for reduksjon i forurensning fra biler, kom til å bli spesielt viktig. Et av kravene var at for å få adgang til å selge biler i California, måtte minst to prosent av bilene de solgte være nullutslippsbiler (ZEV). Dette fikk flere store bilprodusenter til å starte utviklingsprogrammer for nye modeller (i praksis elbiler)

¹¹ Edisons alkaliske batterier ble etter hvert en stor suksess, og fikk mange anvendelser, men ikke i elbiler slik det opprinnelig var tenkt. Se «History of the battery» (2023).

som kunne tenkes å tilfredsstillere kravene. Dette ledet til flere nye elbil-modeller, som for eksempel General Motors «EV 1» (figur 8). Disse var ofte basert på eksisterende bensinbiler, og så derfor ut som «vanlige biler»¹², og med tilsvarende funksjonalitet som disse (bortsett fra rekkevidde). Selv om de gjennomgående ble produsert i et lite antall, vakte de betydelig interesse blant potensielle kjøpere. Men bilprodusentenes egen interesse forsvant nærmest som dugg for solen da noen av dem etter en tid lyktes i å spenne ben for Californias ambisiøse målsettinger på feltet gjennom søksmål i det amerikanske rettsapparatet.¹³ Likevel pekte erfaringene fra disse nullutslippsmodellene framover mot hva som snart skulle komme.



Figur 8. General Motors første elbil, EV1.

Note: EV1 ble markedsført i årene 1996–2003, og totalt ble det produsert i overkant av tusen eksemplarer. Bilen hadde en rekkevidde på 89 km med blybatteri og 169 km med nikkelbatteri (NiMH). Det siste ble etter hvert standard på de fleste nye elbil-modellene som ble lansert i kjølevannet av Californias ZEV-målsettinger, og på hybridbiler da de kom noen år senere. EV1 ble bare leaset ut, ikke solgt. Da GM etter få år avsluttet leasing-programmet, kalte de inn alle bilene for å ødelegge dem, noe som førte til mye kritikk

Kilde: RightBrainPhotography (Rick Rowen), CC BY-SA 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>>, via Wikimedia Commons

¹² I motsetning til små elbiler, hovedsakelig beregnet for kjøring i byer, som ble utviklet av lokale oppstartsselskaper i flere land (for eksempel det norske Think) i disse årene.

¹³ For eksempel kjøpte Ford det norske oppstartsselskapet Think som et ledd i forsøket på å tilpasse seg til kravene i California, men Ford solgte Think igjen etter at disse kravene ble underkjent av rettsapparatet. I praksis ble dette begynnelsen på slutten for Think.

Elbilens akilleshæl hadde hele tiden vært rekkevidde. Utviklingen av litium-ion-batteriet på 1980-tallet skulle imidlertid bidra til å endre dette. Dette nye batteriet, som var lettere og med større energitetthet enn alternativene, ble først kommersialisert av Sony i 1991, og fant i hovedsak anvendelse i bærbar forbrukerelektronikk, pc-er, mobiltelefoner og lignende produkter, som alle opplevde kraftig vekst på denne tiden. Etter hvert skulle det imidlertid også komme til å revolusjonere markedet for elektriske biler. I løpet av noen få år fra 2008 og framover kom flere produsenter, blant annet nykommeren Tesla, men også etablerte aktører som Mitsubishi og Nissan, med nye modeller basert på litium-ion-batterier, og med langt bedre rekkevidde enn tidligere. Det viste seg snart at det var et marked for elbiler, bare funksjonalitet og ytelse var tilstrekkelig. På grunn av elbilens miljømessige fortrinn nøt den også godt av forskjellige støtteordninger i en rekke markeder, og dette bidro også vesentlig til å øke salget. Ikke noe sted var disse støtteordningene større enn i Norge, som av den grunn kom til å bli et foregangsland i overgangen fra fossilbiler til elbiler (Fagerberg, 2022). Kraftig markedsvekst for elbiler og kontinuerlige forbedringer i funksjonalitet og ytelse har siden gått hånd i hånd, og i dag er det en alminnelig antagelse at det bare er et tidsspørsmål før fossilbilen er historie.

Diskusjon

Hva kan vi lære av dette? En ting vi i hvert fall kan enes om, er at grønne teknologier ikke er noe nytt. Vindmøller snurret og produserte elektrisitet, og elbiler rullet rundt på veiene, for mer enn hundre år siden. Det samme gjaldt en rekke andre grønne teknologier som vi ikke har fokusert i detalj på her, som produksjon av hydrogen (og ammoniakk) ved hjelp av grønn elektrisitet, bruk av hydrogen til å drive luftfartøy og så videre. Til og med solcelleteknologi eksisterte da, selv om det fortsatt var på eksperimentstadiet.

Hvorfor ble mange av disse lovende teknologiene lagt i møllposen? Svaret er at de ble valgt bort, fordi det dukket opp alternativer som var billigere og i enkelte henseender bedre, det vi her har kalt det globale fossile skiftet. Det forteller oss noe viktig om innovasjon og samfunnsmessig utvikling. Dersom man ønsker å mobilisere innovasjon for samfunnsmessig endring, som å realisere nullutslippsamfunnet, er det ikke nok å fokusere på utvikling av nye ideer og løsninger. Man må også ha fokus på hva som bestemmer om de nye løsningene kommer i bruk, blir videreutviklet og forbedret, det vil si seleksjonsprosesser.

Hva var det som førte til at de grønne løsningene ble hentet fram igjen? Det var ikke klimakrisen, men en annen krise noen tiår tidligere, knyttet til vestlige lands manglende forsynings sikkerhet på energiområdet. Politikere i mange vestlige land, med USAs daværende president Richard Nixon i spissen, bråvåknet og innså plutselig betydningen av alternative energikilder. Dette ga rom, og midler, til eksperimentering med grønne løsninger for produksjon og bruk av energi. Men like viktig for hva som skjedde var det at disse grønne løsningene ble mottatt med entusiasme

av deler av befolkningen. Folkelige bevegelser og grupper, motivert av ønsker om å bekjempe forurensing og miljødeleggelse og styrke lokal, demokratisk kontroll med energiforsyningen, spilte helt klart en viktig rolle. Bakgrunnen var blant annet utbredt skepsis til kjernekraft på grunn av de alvorlige potensielle skadevirkningene som var blitt klart demonstrert gjennom en serie uhell/ulykker. I de senere år har klimautfordringen, blant annet gjennom FNs klimakonferanser – særlig konferansen i Paris i 2015 og den internasjonale klimaavtalen fra samme år – kommet til som en viktig motiverende faktor. Dette har bidratt til økt oppmerksomhet i mange land om hva som kan gjøres for å møte klimaforpliktelsene, og gitt legitimitet til synspunkter og politikk som det under andre forhold kanskje hadde vært vanskelig å få gehør for.¹⁴ Russlands krig i Ukraina, og energiforsyningsproblemene i kjølvannet av denne, har ytterligere understreket behovet for å få opp farten i omstillingen fra fossil til fornybar energi.

Det har, som demonstrert i denne artikkelen, skjedd en rivende utvikling i grønne teknologier de siste tiårene. Men det er ikke bare teknologien som har utviklet seg, det har også politikk og virkemidler, i gjensidig interaksjon. Da utviklingen begynte på sytti- og åttitallet, var forskningsstøtte og demonstrasjonsprosjekter de virkemidlene politikerne først grep til. Men det ble snart klart at slike grep hadde begrenset effekt (Nemet, 2019). Å gjøre grønn teknologi, som for eksempel vind- og solkraft, konkurransedyktig, krevde radikale endringer i alle ledd i verdikjeden, blant annet framvekst av spesialiserte kapitalvareprodusenter, noe som bare ville bli mulig hvis produksjonsvolumet – og etterspørselen – økte kraftig. Det viktigste grepet for å få til et slikt løft ble å kompensere potensielle kunder for de økonomiske ulempene ved å velge grønne (i stedet for tradisjonelle, forurensende) løsninger. Eksempler på slike etterspørsels-stimulerende initiativer, rettet mot seleksjonsprosessen, er blant annet solpanelsatsingen i Japan, det tyske *Energiewende* og elbilpolitikken i Norge. Disse tiltakene var forbausende effektive. Det viste seg at når mulighetene først var lagt til rette for å gjøre miljøriktige valg, så var det stor vilje i befolkningen – langt større enn politikere og eksperter hadde forutsett – til å slutte opp om de grønne alternativene. Som nobelprisvinneren Elinor Ostrom har påpekt, er det mange som ønsker å bidra til å løse kollektive miljøutfordringer, selv om de i første omgang kanskje ikke profitterer så mye på det selv (Ostrom, 2010). I dette ligger det en betydelig ressurs for endring av økonomi og samfunn i mer bærekraftig retning. Men det krever at politikerne bevisst satser på å inkludere de som er villige til å engasjere seg i løsningen av utfordringene, framfor å handle over hodet på dem.

Et eksempel på fravær av inkludering, og de negative konsekvenser det kan ha for det grønne skiftet, er utbyggingen av landbasert vindkraft i Norge. I foregangsland

¹⁴ For eksempel var flere av de politiske grepene vi har diskutert her, som *Energiewende*, vindkraftpolitikken i Danmark og elbilpolitikken i Norge, lenge utsatt for sterk kritikk, men i alle tre tilfeller stilnet dette av etter at klimamålsettingene kom til å stå mer sentralt i det politiske spillet (Fagerberg, 2022).

som Danmark og Tyskland ble vindkraft på land i stor grad drevet fram gjennom folkelig mobilisering, lokale initiativer og miljøengasjement, hvor lokale eierkollektiver – i Danmark kalt «vindmøllelav» – kom til å spille en viktig rolle.¹⁵ Den sterke lokale forankringen bidro til høy oppslutning i befolkningen om vindkraften. For eksempel er 9 av 10 dansker positive til fortsatt utbygging av vindkraft.¹⁶ I Norge, derimot, ble utbyggingen av vindkraften gjennom vedtak i sentrale organer overlatt til profesjonelle aktører, et flertall av investorene var utenlandske, og den lokale forankringen var svak. Da det etter en tid reiste seg en proteststorm mot vindkraft, var det langt mellom forsvarerne, og den folkelige oppslutningen sank som en stein (Cicero, 2022). Som en konsekvens ble videre utbygging satt på vent. Det er unektelig et paradoks at en grønn, kostnadseffektiv teknologi, som i stor grad har vært drevet fram av miljøinteresser og grønne aktivister i andre land, i brede grupper i Norge assosieres med griske utenlandske kapitalister og rasering av natur. Det skyldes nok ikke først og fremst den aktuelle teknologien, selv om konflikter mellom utbygging og natur ikke skal underslås, men heller den toppstyrte utbyggingsmodellen og mangelen på lokal forankring. Den aktuelle konflikten mellom staten og reindriftsutøvere om vindkraft-utbygging er også en illustrasjon på dette. Dersom man skal lykkes i arbeidet for å øke omfanget av grønn elektrisitetsproduksjon i Norge, trenger man en politikk som i langt høyere grad involverer – og ivaretar interessene til – lokalsamfunn og andre berørte parter (Rambelli & Hinsch, 2019).¹⁷

Heller ikke når det gjelder den kanskje mest potente av alle grønne teknologier, solenergi, har alt gått på skinner i Norge. For Norges del er det anslått at solenergi kan generere like mye elektrisitet som norsk vannkraft gjør i dag uten å komme i konflikt med naturhensyn (Mørk, 2022). Men ulike former for regulering legger hindringer i veien for aktører, store som små, som ønsker å satse på solenergi. For eksempel er det lagt restriksjoner på mulighetene for deling av egenprodusert fornybar elektrisitet som i praksis gjør det lite lønnsomt å investere i dette (Thobroe & Lindsetmo, 2023). Resultatet er at Norge ligger langt etter andre sammenlignbare land i utbyggingen solenergi, på tross av at forskning viser at denne teknologien er godt egnet i norsk klima (Vik, 2021). Dette illustrerer et av Freeman og Perez' sentrale poenger; at reguleringer er som regel tilpasset etablerte teknologier og aktører, og dette vil ofte legge hindringer i veien for spredningen av nye teknologi og bidra til

¹⁵ I Danmark var det på det meste et par tusen slike kollektiver med til sammen over hundre tusen medlemmer, og de sto for mesteparten av Dansk vindkraftproduksjon. Etter hvert har andelen profesjonelle investorer økt. Men fortsatt er det slik at 20 % av av eierskapet i landbaserte vindmølleprosjekter er forbeholdt lokale krefter, som tilbys dette til kostpris (Green Power Denmark, u.å.; «Vindenergi i Danmark», 2023).

¹⁶ <https://winddenmark.dk/tal-fakta/holdninger-til-vindmoller/danskerne-mener>

¹⁷ I rettferdighetens navn må det sies at norske myndigheter har innsett problemet, og bl.a. er i ferd med å legge til rette for økt lokal medvirkning (se f.eks. Meld. St. 28 (2019–2020)). Men mye tyder på at dette er «too little, too late». Fortsatt er reguleringsregimet for vindkraft lang mindre fordelaktig for vertskommunene enn det har vært for vannkraft (NOU 2023: 3).

at samfunnet ikke får den nytten av disse som de kunne ha fått.¹⁸ Det var slike hindringer som for over tyve år siden fikk fremsynte tyske politikere til å utvikle et nytt regulerings- og støtte-system for fornybar energi i Tyskland (*Energiezwecke*). Dersom potensialet for økt produksjon av grønn elektrisitet i Norge skal utnyttes, krever det omfattende organisatoriske og institusjonelle endringer, blant annet i reguleringen av elektrisitets-sektoren.¹⁹

Man kan undre seg over hvorfor forsøk på å bygge ut ny, grønn elektrisitet har støtt på så store problemer nettopp i Norge, som fra naturens side er svært godt rustet for å utnytte de mulighetene vind- og solkraft gir. Det grønne skiftet er avhengig av at mange aktører på ulike nivåer, det være seg enkeltpersoner, bedrifter eller i forvaltningen, drar i samme retning. Myndighetene har selvfølgelig mange virkemidler, økonomiske, legale og så videre, som de kan bruke for å påvirke aktørenes handlinger (Edler & Fagerberg, 2017). Men en vel så effektiv metode kan være å påvirke aktørenes forventninger. Det er liten tvil om at det er mye lettere å få et bredt sett av forskjellige aktører fra ulike deler av samfunnet til å dra i samme retning hvis de har en felles visjon for hvordan samfunnet vil utvikle seg (Fagerberg, 2017). Selv om det kan være krevende å enes om en slik visjon i et demokratisk system, hvor ulike partier konkurrerer, gir det internasjonale samarbeidet om klimamålene – veien mot nullutslipp – en unik mulighet til å få det til, som EUs «grønne giv» viser. Når dette ikke har lyktes i samme grad i Norge, henger nok det sammen med fossilsektorens betydelige rolle i økonomien og sentrale norske politikeres ønske om å satse videre på dette, symbolisert i slagordet om at fossilsektoren skal «utvikles, ikke avvikles». Hvis alt er bra som det er, hvorfor skal man da engasjere seg i – og akseptere kostnadene (ulempene) ved – nye grønne satsinger? Budskapet blir i beste fall uklart.²⁰

Vi har i denne artikkelen vist at en effektiv måte å fremme det grønne skiftet på er å påvirke de valgene ulike økonomiske aktører står overfor, ved å stimulere dem til å velge grønne løsninger framfor mindre miljøvennlige alternativer. Enkelte er kritiske til dette, fordi det etter deres syn er mer effektivt om man begrenser seg til å legge en avgift på utslipp. Det mest kjente eksemplet på et slikt initiativ er EUs kvotemarked, ETS, hvor avgiften på klimagassutslipp (CO₂) blir fastsatt i et marked.

¹⁸ Dette er også et viktig poeng i den samfunnsvitenskapelige litteraturen om overgang til et mer bærekraftig system. I følge sentrale bidragsytere til denne litteraturen (Geels, 2002, 2015; Rip & Kemp, 1998) styres viktige sektorer i samfunnet, som energisektoren, av «sosio-tekniske regimer» tilpasset dominerende teknologier og aktører, noe som gjør det vanskelig for nye teknologier med andre karakteristika å slå igjennom. Viktige temaer i denne litteraturen er bl.a. hvordan slike nye teknologier kan utvikle seg i egnede «nisjer» (Kemp et al., 1998), utfordre de tradisjonelle teknologienes og aktørenes dominans, og bidra til regime-endring (Geels, 2014; Geels & Schot, 2007). Se Fagerberg (2018) for en sammenligning og diskusjon av ulike perspektiver på hvordan innovasjon – og politikk som påvirker dette – kan bidra til et mer bærekraftig samfunn.

¹⁹ Dette er også påpekt av Energikommisjonen (NOU 2023: 3, s. 17).

²⁰ Energikommisjonen er inne på noe av det samme, når de nevner mangelen av en «overordnet fortelling og troverdig forklaring» for hvorfor slike satsinger er nødvendige (NOU 2023: 3, s. 115), som et mulig bidrag til en forklaring på de problemene som har oppstått.

Hva er erfaringene med dette virkemidlet? Mellom 2011 og 2018 lå prisen på utslipp per tonn CO₂ hele tiden under 10 euro, altfor lavt til å ha nevneverdig effekt. Hadde man ikke hatt andre typer politikk i tillegg, hadde det grønne skiftet og energioms-tillingen i Europa antagelig gått mye saktere, og vi hadde vært i en langt vanskeligere situasjon i dag. Så selv om avgift på utslipp av klimagasser er bra, er det altfor risi-kabelt å utelukkende basere seg bare på ett virkemiddel, som i tillegg har vist seg å være sårbart for lobbyvirksomhet, økonomiske sjokk og implementeringsproblemer, og som heller ikke har oppslutning i enkelte toneangivende land, USA for eksempel. Å kreve at man bare skal bruke et virkemiddel for nå et mål, blir som å tvinge en pianist til bare å spille med en finger.

En annen tradisjonell innvending er at politikere ikke kan vite hvilke løsninger som er de beste på lang sikt. Selv om det kan være en kjerne av sannhet i dette, er det ikke så relevant når det gjelder det globale grønne skiftet. For vi vet hvor vi skal – nullutslippssamfunnet – og vi vet også hva vi må gjøre for å komme dit: Det er å støtte opp om det allerede pågående grønne skiftet, karakterisert av blant annet massiv økning i produksjonen av grønn energi, primært sol- og vindkraft,²¹ omfat-tende endringer i systemene for distribusjon og lagring av energi, og elektrifisering av prosesser som i dag er drevet av fossil energi og fører til utslipp av klimagasser. Selv om det ikke er så mange år siden verdens land ble enige om nullutslippsmålet, har de ledende økonomiene i verden, blant annet EU, USA og Kina, allerede tatt svært konkrete skritt i denne retningen. Det ville være direkte uansvarlig av norske politikere å ikke ta hensyn til dette i politikikutviklingen. I næringspolitikken gjelder det for eksempel å ha et våkent øye for de mulighetene som det globale grønne skiftet gir for norsk næringsliv, enten det skjer gjennom nyetableringer eller ved omstilling. I innovasjonspolitikken blir det viktig å identifisere viktige aktiviteter i det grønne skifte med stort behov (og potensial) for forbedring og sette inn støtet der. Det er jo ikke slik at selv om retningen er satt, så er det ikke behov for mer innovasjon, snarere tvert om. Batteriteknologi, energilagring generelt og systemer for energistyring, med

²¹ Et alternativ, som har fått noen tilhengere i Norge i det siste, er kjernekraft, som i dag står for om lag en tidel av verdens elektrisitetsproduksjon. Men problemer knyttet til sikkerhet og avfall (som forblir radioaktivt i tusenvis av år) har redusert oppslutningen om teknologien i mange land. Samtidig har kostnadene ved å bygge nye kjernekraftverk eksplodert (Seba, 2014). Å bygge nye kjernekraftanlegg er derfor en svært dyr måte skaffe seg mer elektrisitet på, mye dyrere enn ved å satse på sol og vind (NOU 2023: 3, s.101). Dette gjelder også for såkalte små modulære reaktorer (SMR), som noen framhever som mer lovende, selv om de har samme (om ikke større) sikkerhets- og avfallsproblemer som konvensjonelle anlegg, og det knapt er noen i drift ennå (IEA, 2022b; Schlissel & Wamsted, 2022). Det er derfor lite trolig at kjernekraft kommer til å spille noen større rolle i det globale energisystemet de nærmeste tiårene enn det gjør i dag. Man kan selvfølgelig ikke utelukke at forskning etter hvert kan komme opp med nye, sikrere kjernekraftteknologier, for eksempel fusjonsreaktorer. Men gitt den korte tiden som er tilgjengelig før 2050, og den lange tiden det tar før nye, radikale oppfinnelser slår igjennom i praksis, er det lite sannsynlig at disse vil bidra vesentlig på veien mot nullutslippssamfunnet.

større rom for lokal involvering og initiativ, kan tjene som eksempler på områder med et stort behov – og potensial – for innovasjon.

Det er imidlertid, som diskutert foran, ikke alt vi vet like mye om. I slike tilfeller er det viktig for politikerne ikke å ta forhastede valg,²² men heller legge opp til eksperimentering med ulike løsninger, gjerne i samarbeid med berørte aktører i inn- og utland, slik at man etter hvert får et bedre kunnskapsgrunnlag for beslutninger. Det gjelder for eksempel hvilken rolle hydrogen kommer til å spille i det grønne skiftet, og hvilke teknologier som kommer til å gjøre jobben i såkalte «vanskelig elektrifiserbare» næringer som internasjonal luftfart og shipping, og tungindustrier som stål og sement. Selv et lite land som Norge kan komme til å spille en viktig rolle i slike innovasjonsprosesser hvis vi velger ut områder hvor vi har spesielle forutsetninger – og behov – for å lykkes. Et slikt område kan for eksempel være maritim sektor, spesielt utenriks sjøfart, hvor Norge har vært – og er – en viktig aktør.

Rundt 80 prosent av de totale klimagassutslippene stammer fra produksjon og bruk av energi. Hvis det pågående globale grønne skiftet, kjennetegnet av massive økninger i produksjon av grønn energi og elektrifisering av prosesser som inntil nå har vært basert på bruk av fossile brenslers, lykkes i å eliminere disse utslippene, vil det være et stort skritt i overgangen til nullutslippssamfunnet. Å nå dette innen midten av århundret vil imidlertid kreve en ekstremt rask oppskalering av fornybar energiproduksjon, og svært høye årlige investeringer for dette formålet, mye høyere enn det som har vært vanlig til nå (IEA, 2021). Målet blir lettere å nå hvis det samtidig satses for fullt på energiøkonomisering/-sparing, ikke minst i bygninger, som i dag står for omtrent en tredjedel av det globale energiforbruket og mer enn halvparten av det globale elektrisitetsforbruket. Derfor er innovasjon og spredning av energisparende teknologier, som varmepumper, og politikk som støtter dette, av avgjørende betydning på veien mot netto-null. Adferdsendringer, for eksempel overgang fra bruk av privatbil til kollektivtransport, er også viktige i denne forbindelse. En annen kilde til energisparing er økt satsing på gjenbruk (sirkulær økonomi), som også innebærer adferdsendringer. Sirkulær økonomi er også viktig for å forhindre at det grønne skiftet stopper opp på grunn av mangel på enkelte ressurser (råvarer). Dessuten må de resterende 20 prosent av de globale utslippene, som hovedsakelig stammer fra landbruk, skogbruk og arealbruk, også kuttes, noe som vil kreve økt innovasjon i disse sektorene, supplert med endringer i produksjons- og forbruksmønstre (f.eks. gjennom overgang fra bruk av rødt kjøtt, som har store klimagassutslipp, til en mer plantebasert kost). Overgangen til nullutslippssamfunnet krever med andre

²² Man kan ikke bare forutsette at alle teknologier, hvis man bare støtter dem nok, vil få samme kostnadsutvikling og bli like attraktive som kjerneteknologiene i det grønne skiftet. Som diskutert tidligere er en slik dynamikk, om ikke helt unik, så i hvert fall ganske sjelden. Det er i denne forbindelse nok å vise til nye kjernekraftanlegg, som – som nevnt over – bare har blitt dyrere å bygge etter hvert som tiden har gått, noe som blant annet har å gjøre med at dette er store, kompliserte, kapitalkrevende prosjekter med betydelig grad av skreddersøm, hvor potensialet for kostnadsreduksjoner ikke er like stort som for masseproduserte, standardiserte moduler.

ord endringer på mange områder, og politikk som støtter opp om dette. Erfaringene tilsier at det er mange som er ønsket å bidra konstruktivt i slike prosesser, at disse utgjør en betydelig ressurs for endring av samfunnet i en mer bærekraftig retning. Noe av det mest effektive politikere kan gjøre for å nå nullutslippsmålene er å utnytte mulighetene dette gir.

Om forfatteren

Jan Fagerberg er en norsk samfunnsøkonom og innovasjonsforsker, med mastergrad fra Universitetet i Bergen i 1980 og doktorgrad fra Universitet i Sussex i 1989. Han ble professor ved Universitetet i Oslo i 1996, hvor han etter et par år var med å starte «Senter for teknologi, innovasjon og kultur» (TIK), som han senere har vært knyttet til. Fagerberg har publisert flere bøker og over hundre artikler i fagtidsskrifter og bøker om innovasjon, innovasjonspolitik, økonomisk utvikling og lignende emner (<https://www.janfagerberg.org/publications/>). Han er blant de 1% mest nedlastede forfatterne i verden innen økonomi og beslektede fag i følge tjenesten «Research Papers in Economics» (<http://repec.org/>).

Referanser

- Bugge, M. M., Andersen, A. D. & Steen, M. (2022). The role of regional innovation systems in mission-oriented innovation policy: Exploring the problem-solution space in electrification of maritime transport. *European Planning Studies*, 30(11), 2312–2333.
- CICERO. (2022). *CICEROs klimaundersøkelse – kort oppsummering årene 2018–2022*. https://xp.cicero.oslo.no/no/api/_attachment/download/3cfadfe2-7334-42f7-b4b6-67e6abdb7880:c08a8b57e95a3734c3e838ea082d2becc76986e2/CICEROs%20klimaunders%C3%B8kelse%202018-2022%20kortversjon.pdf
- Edler, J. & Fagerberg, J. (2017). Innovation policy: What, why, and how. *Oxford Review of Economic Policy*, 33(1), 2–23. <https://doi.org/10.1093/oxrep/grx001>
- Fagerberg, J. (2003). Schumpeter and the revival of evolutionary economics: An appraisal of the literature. *Journal of Evolutionary Economics*, 13, 125–159.
- Fagerberg, J. (2004). Innovation: A guide to the literature. I J. Fagerberg, D. Mowery & R. Nelson (Red.), *The Oxford handbook of innovation* (s. 1–26). Oxford University Press.
- Fagerberg, J. (2017). Innovation policy: Rationales, lessons and challenges. *Journal of Economic Surveys*, 31, 497–512. <https://doi.org/10.1111/joes.12164>
- Fagerberg, J. (2018). Mobilizing innovation for sustainability transitions: A comment on transformative innovation policy. *Research Policy*, 47(9), 1568–1576. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.08.012>
- Fagerberg, J. (2022). Mobilizing innovation for the global green shift: The case for demand-oriented innovation policy. I D. Castellani, A. Perri, V. Scalera & A. Zanfei (Red.), *Cross-border innovation in a changing world – players, places and policies* (s. 272–291). Oxford University Press.
- Fouquet, R. (2016). Lessons from energy history for climate policy: Technological change, demand and economic development. *Energy Research and Social Science*, 22, 79–93. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.09.001>
- Freeman, C. & Louçã, F. (2001). *As time goes by. From the industrial revolution to the information revolution*. Oxford University Press.
- Freeman, C. & Perez, C. (1988). Structural crises of adjustment: Business cycles and investment behaviour. I G. Dosi, C. Freeman, R. R. Nelson, G. Silverberg & L. G. Soete (Red.), *Technical change and economic theory* (s. 38–66). Pinter.
- Geels, F.W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31, 1257–1274. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8)
- Geels, F.W. (2014). Regime resistance against low-carbon transitions: Introducing politics and power into the multi-level perspective. *Theory, Culture & Society*, 31(5), 21–40. <https://doi.org/10.1177/0263276414531627>

- Geels, F.W. (2015). The arduous transition to low-carbon energy: A multi-level analysis of renewable electricity niches and resilient regimes. I J. S. Fagerberg, S. Laestadius & B. R. Martin (Red.), *The triple challenge for Europe: Economic development, climate change and governance* (s. 91–118). Oxford University Press.
- Geels, F.W. & Schot, J. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy*, 36, 399–417. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003>
- Green Power Denmark. (u.å.). *Fakta om grøn energi*. <https://greenpowerdenmark.dk/fakta-om-groen-energi>
- Helpman, E. (Red.). (1998). *General purpose technologies and economic growth*. MIT Press.
- History of the battery. (2023, 28. mars). I Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_battery
- History of wind power. (2023, 1. mai). I Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_wind_power
- IEA. (2020). *World energy outlook 2020*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- IEA. (2021). *Net zero by 2050*. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- IEA. (2022a, 26. oktober). *Global sales and sales market share of electric cars, 2010–2021*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-sales-and-sales-market-share-of-electric-cars-2010-2021>
- IEA. (2022b). *Nuclear power and secure energy transitions*. <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-and-secure-energy-transitions>
- IPCC. (2018). *Global warming of 1.5°C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Karnøe, P. (1991). *Dansk vindmølleindustri – en overraskende international success: Om innovasjoner, industriutvikling og teknologipolitikk*. Samfundslitteratur.
- Karnøe, P. & Garud, R. (2012). Path creation: Co-creation of heterogeneous resources in the emergence of the Danish wind turbine cluster. *European Planning Studies*, 20(5), 733–752. <https://doi.org/10.1080/09654313.2012.667923>
- Kemp, R., Schot, J. & Hoogma, R. (1998). Regime shifts to sustainability through processes of niche formation: The approach of strategic niche management. *Technology Analysis and Strategic Management*, 10(2), 175–198. <https://doi.org/10.1080/09537329808524310>
- Kline, S. J. & Rosenberg, N. (1986). An overview of innovation. I R. Landau & N. Rosenberg (Red.), *The positive sum strategy: Harnessing technology for economic growth* (s. 275–304). National Academy Press.
- Lipsey, R. G., Carlaw, K. I. & Bekar, C. T. (2005). *Economic transformations: General purpose technologies and long-term economic growth*. Oxford University Press.
- Mathews, J. A. (2013). The renewable energies technology surge: A new techno-economic paradigm in the making? *Futures*, 46, 10–22.
- Meld. St. 28 (2019–2020). *Vindkraft på land – endringer i konsesjonsbehandlingen*. Olje- og energidepartementet. <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-28-20192020/id2714775/>
- Morris, C. & Jungjohann, A. (2016). *Energy democracy – Germany's Energiewende to renewables*. Palgrave MacMillan.
- Mørk, C. A. (2022, 15. august). *Sol kan bli like stort som vannkraft i Norge*. Multiconsult. <https://www.multiconsult.no/sol-kan-bli-like-stort-som-vannkraft-i-norge/>
- Nemet, G. F. (2019). *How solar energy became cheap – a model for low-carbon innovation*. Routledge.
- Nielsen, K. H. (2018, 8. juli). Vindmøllens historie: Sådan tømmede danskerne vindens energi. *Videnskab*. <https://videnskab.dk/teknologi/vindmoellens-historie-saadan-taemmede-danskerne-vindens-energi/>
- NOU 2023: 3 (2023). *Mer av alt – raskere — Energikommisjonens rapport*. <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2023-3/id2961311/>
- Ostrom, E. (2010). Polycentric systems for coping with collective action and global environmental change. *Global Environmental Change*, 20(4), 550–557. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.07.004>
- Perez, C. (2002). *Technological revolutions and financial capital: The dynamics of bubbles and golden ages*. Edward Elgar.
- Perez, C. (2016). Capitalism, technology and a green global golden age: The role of history in helping to shape the future. I M. Jacobs & M. Mazzucato (Red.), *Rethinking capitalism: Economics and policy for sustainable and inclusive growth, the political quarterly* (s. 191–207). Wiley-Blackwell.
- Rambelli, G. & Hirsch, A. (2019). *WinWind factsheet #2: Drivers for socially inclusive deployment of wind energy*. ICLEI Local Governments. https://winwind-project.eu/fileadmin/user_upload/Resources/Factsheets/WinWind-factsheet-2-EN-www.pdf
- Rip, A. & Kemp, R. (1998). Technological change. I S. Rayner & E. L. Malone (Red.), *Human choice and climate change, vol. 2, resources and technology* (s. 327–399). Battelle Press.
- Schumpeter, J. (1939). *Business cycles: A theoretical historical and statistical analysis of the capitalist process* (2 bd.). McGraw-Hill.

- Seba, T. (2014). *Clean disruption of energy and transportation: How Silicon Valley will make oil, nuclear, natural gas, coal, electric utilities and conventional cars obsolete by 2030*. Clean Planet Ventures.
- Siemens, W. (1885). On the electromotive action of illuminated selenium, discovered by Mr. Fritts of New York. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 19(119), 315–316. <https://doi.org/10.1080/14786448508627681>
- Schlissel, D. & Wamsted, D. (2022). *NuScale's small modular reactor: Risks of rising costs, likely delays, and increasing competition cast doubt on long running development effort*. The Institute for Energy Economics and Financial Analysis.
- Smil, V. (2016). Examining energy transitions: A dozen insights based on performance. *Energy Research & Social Science*, 22, 194–197. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.017>
- Stinson, J. (2022, 25. januar). Battery-electric vs. hydrogen trucks: The debate heads into 2022. *Transport Dive*. <https://www.transportdive.com/news/Trucking-battery-electric-versus-fuel-cell-hydrogen/610283/>
- The Royal Society. (2020). *Ammonia: Zero-carbon fertiliser, fuel and energy store*. <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/green-ammonia/green-ammonia-policy-briefing.pdf>
- Timperley, J. (2021, 9. desember). When it comes to buses, will hydrogen or electric win? *Wired*. <https://www.wired.com/story/future-buses-hydrogen-electric/>
- Thobroe, G. & Lindsetmo, B. (2023, 7. mars). *Må kjøpe strøm de selv produserer fordi solcellene er fordelt på to bygg*. NRK. <https://www.nrk.no/trondelag/malvik-fryselager-ma-kjope-strom-de-selv-produserer-fordi-solcellene-er-fordelt-pa-to-bygg-1.16321487>
- Vik, S. (2021, 21. januar). *Norsk klima perfekt for solenergi – likevel henger vi etter*. NRK. <https://www.nrk.no/tromsogfinnmark/norsk-klima-gir-gode-forhold-for-a-utvikle-solkraft-1.15330672>
- Vindenergi i Danmark. (2023, 1. mai). I *Wikipedia*. https://da.wikipedia.org/wiki/Vindenergi_i_Danmark
- Wilson, C. (2012). Up-scaling, formative phases, and learning in the historical diffusion of energy technologies. *Energy Policy*, 50, 81–94. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.077>
- Ziegler, M. S. & Trancik, J. E. (2021a). Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline. *Energy & Environmental Science*, 14, 1635–1651. <https://doi.org/10.1039/D0EE02681F>
- Ziegler, M. S. & Trancik, J. E. (2021b). *Data series for lithium-ion battery technologies*. Trancik Lab Dataverse. <https://doi.org/10.7910/DVN/9FEJ7C>

Abstract in English

The global green shift: More evolution than revolution

UN's climate panel has concluded that emissions of climate gasses must be reduced to net zero by the middle of this century if serious damages to nature and society are to be avoided. This article analyses the process towards a net-zero society, the global green shift, and the driving forces behind these changes, including the role of policy. Since 80% of global emissions stem from use of fossil energy, the transition from a fossil-fuel based system to a system powered by renewables becomes particularly important. Three aspects of the shift, discussed in the article, are massive increases in production of green electricity, use of this as substitute for fossil fuels in various parts of society, and improvements in the infrastructure that knits these elements together. Having analysed the dynamics of the green shift, the article goes more in depth on how some central technologies, i.e., solar and wind energy, batteries and electrical cars, have evolved, including what role public opinion, demand, and policy have had for what happened. Finally, the lessons from the study are considered.

Keywords: green shift • zero emissions • renewable energy • batteries • electric car