

Flytende vindmøller og samfunnsøkonomisk lønnsomhet

Anvendelse av en ny erfaringskurvemetode

Tone Ellefsen Lye

30.04.2008

**Department of Economics
University of Oslo**

Forord

Først vil jeg starte med å takke Statistisk Sentralbyrå (SSB) for finansiering av arbeidet gjennom forskningsprosjektet ”Subsidizing Carbon Abatement in Small, Open Economies”.

Arbeidet med masteroppgaven har vært både inspirerende og lærerikt, og har ikke bydd på mange tunge stunder. Det vil jeg gi veilederen min, Mads Greaker, mye av æren for. Ved siden av å være forskningsleder i ”Gruppe for økonomisk vekst og effektivitet” ved SSB, har han tatt seg god tid til å legge et løp for oppgaven som passer meg, og å gi tydelige og konkrete tilbakemeldinger. Tid er også satt av til engasjerende faglige innspill, samt til diskusjon om hvor i Marka man finner de fineste skiløypene.

Jeg takker også alle som med tålmodighet har svart på mine spørsmål om alt fra vindhastighet, turbinkapasitet og vingespenn til subsidier, kostnader og innovasjonsteori. Spesielt vil jeg takke Jan-Fredrik Stadaas i Statoil Hydro som ga så mye av sin tid.

Moren min fortjener også en stor takk for å ta seg bryet med å lese korrektur. Råd til språk og innhold var svært nyttig.

Eventuelle feil og uklarheter i teksten er mitt ansvar alene.

Oslo, 30.april 2008

Tone Ellefsen Lye

Sammendrag

Denne oppgaven kommer med et bidrag til hvordan samfunnet med bedre presisjon og sikkerhet kan plukke ”riktige” utslippsreducerende teknologier i forhold til klimaproblematikken. Helt spesifikt søker oppgaven et svar på om flytende havvindmøller i fremtiden vil kunne konkurrere med andre ”rene” energikilder, som for eksempel kullkraft med rensing eller atomkraft. Tradisjonell landfast vindkraft har allerede mye erfaring med produksjon, og kostnadene for denne teknologien har sunket radikalt de siste to tiårene. Fordelen med flytende vindkraft i forhold til landfast vindkraft, er kort oppsummert at vinden er sterkere og mer stabil på sjøen, og at problemer og konflikter ved lokalisering unngås. Fordi flytende vindkraft er en videreføring av en godt utprøvd teknologi, er det naturlig å vurdere om mye av potensialet for kostnadsreduksjon allerede er ”brukt opp”.

Erfaringskurver er et verktøy som brukes til å fremskrive forventet fremtidig kostnadsreduksjon hos umodne teknologier. Et annet viktig bruksområde er analyse av ulike politiske virkemidler og insentivsystemer for nye teknologier. Erfaringskurver er en enkel sammenheng mellom akkumulert produksjon og enhetskostnader, som er avdekket av en rekke empiriske studier. For mange teknologier er det vist at enhetskostnadene faller med en konstant rate for hver dobling av akkumulert produksjon. Kostnadene vil altså falle raskest når teknologien er helt ny. Etter hvert som teknologien modnes vil kostnadene flate ut.

En flytende vindmølle vil være sammensatt av flere ulike komponenter. Noen av komponentene vil produseres for første gang, mens andre komponenter allerede er produsert i tusenvis av eksemplarer. Kostnadene vil derfor synke med forskjellig hastighet hos vindmøllens ulike komponenter. Derfor utvikler oppgaven en metode for å dekomponere erfaringskurven til hele vindmøllen. Slik blir det mulig å finne et bedre anslag for hvordan kostnadene til hele vindmøllen faktisk vil utvikle seg.

I dag er både fast forankret offshore vindkraft langs kysten og teknologien for flytende vindkraft langt fra konkurransedyktig. Det gjør at bedriftene i en oppstartsfasen må gå med tap før de har beveget seg langt nok nedover kostnadskurven. De norske selskapene som i dag utvikler flytende vindkraft mener at staten bør dekke dette tapet inntil teknologien blir konkurransedyktig. Oppgaven problematiserer derfor også argumentene bak dette kravet.

Erfaringskurver er ofte blitt brukt til å fremskrive kostnader, og også for å argumentere for produksjons- og investeringsstøtte av nye teknologier. Derfor presenterer det første kapittelet litteraturen, historien og teorien bak lærings- og erfaringskurver. Erfaringskurvene har for eksempel vært viktig for utformingen av økonomiske vekstmodeller med endogen læring. Erfaringskurvene har imidlertid en rekke begrensninger, og det internasjonale energibyrået (IEA 2000) anbefaler at man bør utvikle dette verktøyet videre slik at resultatene fra erfaringskurveanalysen blir sikrere og mer presis. Så vidt det er kjent, har det ikke tidligere blitt gjort forsøk på å lage en erfaringskurvemodell der teknologien dekomponeres ut i fra tidligere erfaring. Resultatene viser at jo flere utgaver av en enkeltkomponent som er laget, og jo større del av vindmøllen denne komponenten utgjør, jo tregere vil kostnadene synke.

For å vise hvordan denne metoden kan anvendes, har oppgaven samlet informasjon fra de to norske bedriftene som utvikler teknologi for flytende vindkraft. Ved å se på tre ulike scenario for erfaring hos de ulike komponentene, blir det klart at flytende vindkraft ikke vil bli lønnsom ut i fra modellens forutsetninger. Turbinen hos den flytende vindmøllen utgjør en stor andel av kostnadene. Siden denne allerede er produsert i stor skala vil kostnadene synke for sakte. Samfunnets begrensede ressurser bør heller brukes til å utvikle andre mer kostnadseffektive utslippsreducerende teknologier.

Selv om det likevel viser seg at teknologien er samfunnsøkonomisk lønnsom, vil ikke det automatisk si at det er samfunnsøkonomisk riktig å subsidiere aktørene for å opprette et marked. Ved betydelig spillover blir kunnskap som skapes ved produksjon fritt tilgjengelig for hele samfunnet, uten at bedriften som produserer kunnskapen får betalt for det. Ved stor kunnskapsoverføring er det ingen bedrifter som vil ta på seg tapet som investeres i en oppstartsperiode. Det er fordi flere bedrifter senere kan entre markedet og ”stjele” profitten som skulle ha dekket investeringen. I en slik situasjon kan subsidier være et godt virkemiddel. Men i følge informasjon fra Sway og Hywind er ikke spillover et stort problem for flytende vindmøller.

Opgaven viser at forskjellige metoder og forutsetninger kan gi svært ulike resultater når kostnader fremskrives. Usikkerheten ved utvikling av nye teknologier er svært høy, og det anbefales derfor å satse på en bred portefølje av teknologier (Stern 2007, Cohen og Noll

1991, m.fl.). Demonstrasjonsfasen i et prosjekt er imidlertid svært kostbar. Med mer presise fremskrivningsverktøy kan man lettere luke ut ulønnsomme prosjekter før det brukes for mye ressurser på utvikling av disse. Dekomponering av erfaringskurver kan bidra til å redusere usikkerheten på et tidlig stadium.

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Oppbygning.....	3
1.2	Forskningsspørsmål.....	4
2	Erfaringskurver; historie og kritikk	5
2.1	Historien om erfaringskurvens bruk i vekstmodeller	5
2.2	Basismodellen for erfaringskurver	11
2.3	Driverne bak kostnadsfall og kritikk av erfaringskurver.....	13
2.3.1	Skalaeffekter.....	14
2.3.2	Forskning og utvikling	16
2.3.3	Spillovereffekter.....	16
2.3.4	Definisjon av enheter.....	19
3	En modell for dekomponering av erfaringskurver	21
3.1	Formulering og notasjon	21
3.2	Noen resultater	24
4	Status for utvikling av flytende vindmøller	30
4.1	Potensial og aktører	30
4.1.1	Hywind	32
4.1.2	Sway	33
4.2	Utfordringer, begrensninger og erfaringspotensial	34
4.3	Kostnadsfordeling og krav om støtte.....	36
5	Scenario- og rammeverksanalyse med drøfting av resultater	38
5.1	Tre scenarier og fire komponenter	38
5.2	Læringsinvesteringer og rammeverk for umodne teknologier.....	41
5.2.1	Erfaringskurver som analyseverktøy.....	42
5.2.2	Optimal subsidie.....	47
6	Konklusjon	49
7	Kilder	51
8	Vedlegg	54
8.1	Simuleringer i excel.....	54

1 Innledning

De siste årene har flere vitenskapelige rapporter gitt bakgrunn for bred konsensus blant forskere og beslutningstakere om at det er økonomisk fornuftig å bekjempe den pågående klimaforandringen. På oppdrag for den britiske finansministeren ble ”The Stern Review on the Economics of Climate Change” publisert høsten 2006. Sternrapporten sjokkerte verden ved å melde at en økning på 5 grader i verdens middeltemperatur frem til år 2100 vil bety en kostnad på mellom 5 og 20 prosent av verdens samlede bruttonasjonalprodukt. Samtidig er rapporten optimistisk. Den mener at det er mulig å redusere denne kostnaden til 1 prosent hvis man klarer å begrense utslippene av klimagasser frem til år 2050. I 2007 kom den fjerde rapporten til FNs klimapanel. Den slo fast at forskere aldri har vært sikrere på at klimaendringene er menneskeskapte.

Som en følge av dette har regjerings- og opposisjonspartiene i Norge blitt enige om en langsiktig klimahandlingsplan der satsning på fornybar energi er et av hovedelementene. Arbeidsgruppen Energi21 leverte i begynnelsen av februar 2008 en rapport der offshore vindkraft er et av de to høyest prioriterte områdene for langsiktig forskning og utvikling. Til tross for at andre land har mye større erfaring med vindkraft håper olje- og energiminister Åslaug Haga at den norske offshore-ekspertisen skal føre Norge inn i en ny ”oljealder”. I februar 2008 sa hun i en pressemelding (OED 2008)

Norge bør definitivt ha som ambisjon å bli en eksportør av rein og fornybar energi. Det fordrer at alle gode krefter jobber sammen, at vi prioriterer fornuftig og selvfølgelig også at myndighetene stiller opp med penger

Mens det er det enorme potensialet for kraftproduksjon som er blitt frontet av politikere og gründere vil denne oppgaven se nærmere på kostnadene. Spørsmålet er om kraft fra flytende havvindmøller vil kunne konkurrere med andre utslippsfrie energikilder på pris. Kanskje vil for eksempel kullkraft med rensing eller atomkraft være ”riktigere” og mer lønnsomme teknologier å satse på når formålet er å håndtere klimaproblemene.

På verdensbasis har gjennomsnittskostnadene for vindkraft sunket kraftig i takt med bygging og bruk av stadig flere og større vindparker de to siste tiårene. Landfaste vindturbiner kan imidlertid enda ikke konkurrere med fossile energikilder på pris, og har begrensninger både når det gjelder stabil vindkraft og påvirkning på omgivelsene. Enkelte mener at landfast vindkraft ikke bør subsidieres, men skattlegges på grunn av de negative effektene de har på omgivelsene (Skonhøft 2007). Derfor er produksjon av fast forankrede offshore vindparker langs kysten startet opp de senere årene. Disse overkommer noen av problemene til landfaste vindturbiner, men har per i dag mye høyere gjennomsnittkostnader enn landfaste turbiner. I tillegg bidrar også disse vindparkene til konflikter når det gjelder lokalisering. Forretningsideen til de to norske aktørene Sway og Hywind (Statoil Hydro) er dermed å overkomme problemene knyttet til ustabil vindhastighet og lokalisering. Dette skal skje ved utvikling av teknologi som gjør det mulig å produsere energi fra flytende vindturbiner lokalisert 50 til 60 kilometer fra land.

Erfaringskurver er et verktøy som brukes for å fremskrive forventet fremtidig kostnadsreduksjon for de flytende vindmøllene. Empiriske studier har vist en klar fallende sammenheng mellom akkumulert produksjon og kostnader hos en rekke teknologier. Erfaringskurvene viser at enhetskostnadene faller med en konstant rate for hver dobling av akkumulert produksjon. Kostnadene vil altså falle raskest når teknologien er helt ny. Etter hvert som teknologien modnes vil kostnadene flate ut. Det er på dette grunnlaget man ser muligheten for at fornybare energiteknologier i fremtiden skal kunne konkurrere med konvensjonell elektrisitetproduserende teknologi.

Det er allerede høstet betydelig erfaring fra tradisjonell landfast vindkraft. Da forventes det at flytende vindkraft vil starte opp produksjon med et mindre potensial for kostnadsreduksjon enn hos en helt ny teknologi. Enkelte komponenter kan anses som modne, ettersom de allerede er blitt produsert i betydelige mengder på verdensbasis. Kostnadsreduksjon ved tillegg i akkumulert produksjon for disse komponentene vil dermed være forsvinnende liten. Derfor utvikler oppgaven en metode for å dekomponere erfaringskurven til hele vindmøllen. Slik blir det mulig å finne et bedre anslag for hvordan kostnadene faktisk vil utvikle seg.

1.1 Oppbygning

Erfaringskurver er et populært verktøy for å fremskrive kostnader eller for å argumentere for produksjons- og investeringsstøtte av nye teknologier. Derfor vil det første kapittelet presentere litteraturen og teorien bak lærings- og erfaringskurver slik at leseren får en forståelse for fordelene og ulempene ved dette analyseverktøyet. Erfaringskurvene har for eksempel vært viktig for utformingen av økonomiske vekstmodeller med endogen læring¹, men har også mange begrensninger.

For å bevise og tydeliggjøre hva tidligere erfaring hos enkeltkomponenter har å si for kostnadsutviklingen foreslår kapittel 3 en matematisk modell for dekomponering av erfaringskurver. Så vidt det er kjent, har det ikke tidligere blitt gjort forsøk på å lage en erfaringskurvemodell der teknologien dekomponeres ut i fra tidligere erfaring. I det påfølgende empiriske kapittelet samles informasjon om kostnadsfordeling og utviklingsplan fra de to aktørene Sway og Hywind.

Det avsluttende diskusjonskapittelet innledes med å anvende empirien fra kapittel 4 i en scenarioanalyse for kostnadsutvikling hos flytende vindmøller. De tre ulike scenariene brukes til å underbygge resultatene fra kapittel 3.

Med den fallende sammenhengen i erfaringskurvene som bakgrunn argumenteres det for høyere produksjonssubsidier til flytende vindkraft. Når produksjonen eventuelt starter opp vil den være langt fra konkurransedyktig. Det gjør at bedriftene i en periode må gå med tap inntil de har beveget seg langt nok nedover kostnadskurven. Dette tapet mener Sway og Hywind at staten bør dekke. Oppgaven problematiserer derfor argumentene bak dette kravet i det siste kapittelet.

Her diskuteres også hvordan modeller med endogen læring kan brukes til å utforme optimale politikkverktøy. I en tidligere masteroppgave fra økonomisk institutt ved Universitetet i Oslo finner Henning Wahlquist (Wahlquist 2007, s.46) at det er uklart om den mye brukte MARKAL-modellen vil kunne analysere privat sektors respons på endogen læring. Disse bottom-up-modellene antar ofte perfekt spillover slik at kunnskap flyter fritt mellom bedrifter, industrier og land. Høy grad av spillover gir argumenter for subsidier, men det er

¹ Med begrepet "endogen læring" mener man at læringen kommer fra selve produksjonen og ikke fra en ekstern faktor som for eksempel generell teknologiutvikling i samfunnet.

sjelden man opplever at kunnskap adopteres så lett av andre aktører. Det siste kapitlet diskuterer under hvilke forhold staten bør subsidiere nye teknologier generelt, og om dette gjelder for flytende vindkraft spesielt. Det vil for eksempel være logisk å tenke at private aktører er villige til å gå med tap i en tidlig periode hvis de vet at teknologien i fremtiden vil gi dem positiv avkastning som kan dekke inn tapet. I denne diskusjonen brukes hovedsakelig erfaringskurver for å underbygge argumentasjonen.

1.2 Forskningsspørsmål

For å oppsummere innledningen gjentas oppgavens forskningsspørsmål her. Det første spørsmålet er om flytende vindmøller er rett teknologi å satse på når målet er å begrense verdens klimautslipp. Med andre ord ønsker oppgaven å finne ut om flytende vindmøller vil bli lønnsomt innen en rimelig tidshorisont.

Fordi oppgaven i hovedsak bruker erfaringskurver som verktøy for å finne svaret på oppgavens hovedspørsmål følger et naturlig sidespørsmål. Hvordan kan erfaringskurver brukes til å fremskrive kostnader, og til å analysere politiske virkemidler for teknologiutvikling?

2 Erfaringskurver; historie og kritikk

Bakgrunnen for oppgavens hovedverktøy, erfaringskurver, er en sammenheng som først ble rapportert på midten av 1930-tallet (Wright 1936). Wright oppdaget at arbeidskraftkostnadene per produserte enhet på en flyfabrikk sank med en konstant prosentandel for hver dobling av akkumulert produksjon. Denne sammenhengen mellom arbeidskraftens grenseproduktivitet og akkumulert produksjon av en bestemt produkttype hos en gitt produsent er det som kalles en læringskurve.

2.1 Historien om erfaringskurvens bruk i vekstmodeller

Allerede tidlig på 1900-tallet introduserte Joseph Schumpeter entreprenørskap og konseptet ”kreativ destruksjon” i sine konjunkturmodeller. Likevel har entreprenøren og endogen økonomisk vekst fått liten oppmerksomhet i vekstteoriens rammeverk inntil de siste tretti årene. Den kjente og dominerende neoklassiske vekstmodellen til Solow og Swan (Solow 1956) anså kunnskap som en eksogen variabel som øker med tiden. Dette gir teknologisk endring og vekst uavhengig av produksjon og politiske virkemidler. Solow-modellen antar at utbyttet fra kapital er avtagende. På grunn av denne antagelsen vil økonomiens vekstrate på lang sikt konvergere mot en likevekt. Nivået på vekstraten avhenger av endring i eksogen teknologisk fremgang.

I en standard vekstmodell på Cobb-Douglas-form, der Y står for produksjon, K for kapital, L for arbeidskraft, og a er et tall mellom 0 og 1, utgjør A en variabel for teknologisk endring:

$$(2.1) Y = AK^aL^{1-a}$$

Til tross for denne modellen sin popularitet, har den blitt kritisert for ikke å forklare hvordan eller hvorfor teknologisk fremgang oppstår. Trygve Haavelmos ”A study in the theory of economic evolution” (Haavelmo 1954) var kanskje det første forsøket på å endogenisere teknologisk endring i vekstmodeller. Her introduserer han “the educational effect at point of time t of a dose of capital invested..”(Haavelmo 1954 s.38). Med referanser til Haavelmos artikkel introduserte Arrow senere begrepet ”learning by doing” i sin artikkel ”The economic implications of learning by doing” (Arrow 1962). Arrow var også enig i at den eksogene tilnærmingen var for enkel for å fremstille fenomenet kunnskap. Hans vekstteori var en av de

første som tok innover seg endogen kunnskap i form av læringskurver. Modellen blir ofte referert til i artikler om erfaringskurver og vil derfor presenteres mer utførlig i denne oppgaven.

I Arrows modell er det repetering av en og samme oppgave som gir avtagende læringsutbytte. Dermed er man avhengig av gjentatte stimulus for å oppnå ny kunnskap og læring. Et annet poeng i Arrow sin teori er at hvert enkelt firma oppnår konstant skalaavkastning fra kapital, mens industrien eller økonomien som helhet får økende avkastning. Den vanlige Cobb-Douglas-funksjonen for et enkelt firma vises slik:

$$(2.2) Y_i = A_i K_i^a L_i^{1-a}$$

Arrow mener imidlertid at A_i ikke er firmaspesifikk, men relatert til total "kunnskap" og erfaring i økonomien. Teknologiparameteren er felles for alle firma, og det er med andre ord hundre prosent spillover² i modellen. Det vil si at kunnskap hele tiden er fritt tilgjengelig for alle aktører. Akkumulert produksjon av kapitalvarer (brutto investering) brukes som et mål på erfaring og gis notasjonen G .

I modellen vil den nye kapitalvaren ta med seg den kunnskapen som er tilgjengelig ved hvert tidspunkt, men vil ikke ta til seg ny kunnskap etter at den er blitt tatt i bruk. Jo høyere serienummer på kapitalvaren G jo nyere er kapitalvaren og jo mindre arbeidskraft er nødvendig for å oppnå det samme nivået på produksjon. I tillegg til økt arbeidsproduktivitet på eksisterende kapital gir investering i den nye kapitalvaren G også økt arbeidsproduktivitet for alle følgende kapitalvarer. Den teknologiske faktoren er relatert til kunnskap og erfaring på denne måten; $A_i = G^z$

I det fysiske kapitalbeholdning akkumuleres vil kunnskap hos et spesifikt firma akkumulere med en positiv andel z slik at:

$$(2.3) Y_i = G^z K_i^a L_i^{1-a}$$

² Begrepet "spillover" presenteres og forklares i underkapittel 2.3.3.

Der G^z ikke er firmaspesifikk, men anses som et fritt, offentlig gode. Aggregert antas det at $G = K$ og produktfunksjonen for hele økonomien blir:

$$(2.4) Y = K^{a+z} L^{1-a}$$

Fordi $a + z + 1 - a > 1$ er det tydelig at det blir tiltagende skalautbytte når kunnskap inkluderes.

Selv om Wright allerede på 30-tallet identifiserte den fallende sammenhengen mellom kostnadsfall og akkumulert produksjon, var Arrow en av de første til å innlemme denne spesielle sammenhengen i en vekstmodell.

Modellene til blant andre Haavelmo og Arrow var et gjennombrudd fordi det ble mulig å se hvordan politikk påvirker vekst gjennom læringseffekten. For å gå nærmere inn på hvordan erfaringskurvene bidrar til å endogenisere læring i vekstmodeller, kan det være nyttig å gå gjennom Arrow sin modell i mer detalj. Her presenteres derfor modellen mer utførlig:

Notasjon:

$\lambda(G)$ - mengden arbeidskraft brukt i produksjonen med en kapitalvare med serienummer G

$\kappa(G)$ - produksjonskapasiteten til en kapitalvare med serienummer G

x – total produksjon

L – total arbeidsstyrke sysselsatt

T – gitt livstid for kapitalvaren

G' – den eldste kapitalvaren i produksjon.

En forutsetning i modellen er at $\lambda(G)$ er en ikke-økende funksjon og at $\kappa(G)$ er en ikke-avtagende funksjon. Dermed vil det alltid lønne seg å bruke en nyere kapitalvare fremfor en eldre. På et gitt tidspunkt har kapitalvarene i bruk serienummer fra G' til G . Arrow sin modell bygger på Leif Johansen sin såkalte "putty-clay"-tilnærming fra 1959 (Johansen 1972). Dette innebærer at når en ny årgang kapital kommer i bruk vil ikke lønnsomheten ved

bruk av kapitalvaren utvikle seg. Utviklingen ”stivner” akkurat som leire (clay). Læring uttrykkes heller ved at nye generasjoner kapitalvarer kommer i bruk. Den eldste kapitalvaren med serienummer G' gir profitt lik null. Hvis profitten (eller kvasirenten) er positiv vil det lønne seg å bruke et lavere serienummer. Hvis kvasirenten er negativ er det ikke optimalt å la denne kapitalvaren fortsette å være i produksjon (Johansen 1972 s.16).

$$(2.5) \quad x = \int_{G'}^G \kappa(G) dG$$

Ligning (2.5) uttrykker total produksjon ved bruk av kapitalvare med serienummer fra G til G' . Mengden arbeidskraft ved hver nye kapitalvare er gitt.

$$(2.6) \quad L = \int_{G'}^G \lambda(G) dG$$

Ligning (2.6) er et uttrykk for den totale mengden arbeidskraft sysselsatt når man bruker kapitalvarer med serienummer fra G til G' .

Det forutsettes at kapitalvarene har en gitt livstid slik at;

$$(2.7) \quad G'(t) \geq G(t-T)$$

Arrow utnytter at man kan finne G' , den eldste kapitalvaren i produksjon, fra (2.5) og (2.6) eller (2.7). Det er mulig når $G(t)$ er gitt ved tidspunkt t , og $L(t)$ er gitt ved full sysselsetting. Analogt til den vanlige produktfunksjonen kan man da skrive x som en funksjon av L og G ved å finne $G'(t)$ fra (2.6) og å substituere resultatet inn i (2.5).

De udefinerte integralene³ gir uttrykk for henholdsvis akkumulert mengde arbeidskraft og akkumulert mengde produsert som en funksjon av total akkumulert produksjon av kapitalvarer. Disse udefinerte integralene settes opp her:

³ At integralene er ubestemte vil si at det ikke er bestemt noen øvre eller nedre grense for integralet (Sydsæter 2003). Likevel vil integralet her på en måte være begrenset. Integralet av det som skjer før produksjonen har startet opp vil være lik null. Samtidig begrenses integralet oppad ved serienummer G som er gitt i funksjonen.

$$(2.8) \quad \begin{aligned} \Lambda(G) &= \int \lambda(G) dG \\ \Gamma(G) &= \int \kappa(G) dG \end{aligned}$$

Ligning (2.8) gir altså et uttrykk for alt som er produsert og all arbeidskraft som er brukt fra produksjonen startet opp og frem til tidspunktet da kapitalvare med serienummer G kommer i bruk. Første ligning angir total mengde arbeidskraft som er brukt og den andre ligningen angir hvor mye som er produsert.

Skriver om (2.5) og (2.6) ved hjelp av (2.8):

$$(2.5') \quad x = \Gamma(G) - \Gamma(G')$$

$$(2.6') \quad L = \Lambda(G) - \Lambda(G')$$

Både $\Lambda(G)$ og $\Gamma(G)$ er strengt voksende slik at de begge har en invers funksjon; $\Lambda^{-1}(u)$ og $\Gamma^{-1}(v)$. Dermed kan man løse G' fra (2.6) på denne måten:

$$(2.9) \quad G' = \Lambda^{-1}[\Lambda(G) - L] \kappa(G)$$

(2.9) substitueres inn i (2.5):

$$(2.10) \quad x = \Gamma(G) - \Gamma\{\Lambda^{-1}[\Lambda(G) - L]\}$$

Ligning (2.10) utgjør en produktfunksjon der L står for tilgjengelig arbeidskraft. Arrow antar røft at kapital/produksjonsraten er konstant. Samtidig bruker han sammenhengen fra Wrights studie av læringskurver for flyskrog der mengden arbeidskraft er en synkende funksjon av G :

$$(2.11) \quad \kappa(G) = a$$

$$(2.12) \quad \lambda(G) = bG^{-n}, \quad n > 0$$

Ser ved å bruke (2.8) at:

$$\rightarrow \Gamma(G) = aG \text{ og } \Lambda(G) = cG^{1-n} \text{ der } c = \frac{b}{1-n} \text{ for } n \neq 1$$

Får to uttrykk henholdsvis for situasjonene $n \neq 1$ og $n = 1$, der n er læringsraten.

$$(2.13) \quad x = aG \left[1 - \left(1 - \frac{L}{cG^{1-n}} \right)^{\frac{1}{1-n}} \right]$$

$$(2.14) \quad x = aG \left(1 - e^{-\frac{L}{b}} \right)$$

De to uttrykkene, (2.13) og (2.14), er en tilnærming til den originale produktfunksjonen. I motsetning til Solow-modellen viser disse imidlertid en økende skalaavkastning i variablene L og G . I (2.13) vil en økning i G , når L holdes konstant, gi en proporsjonal økning i x . Økes L samtidig får man en ytterligere økning i x . I (2.14), antatt at $n < 1$, vil en proporsjonal økning i L og G øke uttrykket $\frac{L}{G^{1-n}}$ slik at uttrykket i parentes som multipliseres med G også øker. Det samme argumentet holder når n er strengt større enn 1. Uavhengig av spesifikasjonene i (2.11) og (2.12) vil x øke mer enn proporsjonalt med skalaendringer i L og G generelt. Dette er intuitivt når arbeidskraft og kapital brukes mer effektivt etter hvert ettersom $\lambda(G)$ er ikke-økende og $\kappa(G)$ er ikke-avtagende.

Et av Arrows viktigste poeng er at når læring er et biprodukt av produksjon, vil en investering i dag gi nytte for fremtidige investorer. Denne nytten anses som en positiv eksternalitet som ikke inngår i markedets prising. Når dette er tilfelle vil den totale mengden som investeres være lavere enn det som er samfunnsøkonomisk optimalt. Arrow foreslår ingen løsning på dette problemet, men fordelene med endogene modeller er at de kan vise hvordan politisk rammeverk påvirker den langsiktige vekstraten. Fra slutten av det 20. århundre har man i større grad utviklet og tatt i bruk endogene vekstmodeller (Gielen med flere 2003). Å subsidiere investeringer og produksjon har vært et av de mest populære virkemidlene for å støtte nye teknologier med stort potensial for læring.

Både solceller og vindkraft har for eksempel utvidet sitt marked delvis på grunn av subsidier fra offentlige prosjekter. Sternrapporten anbefaler derfor økte subsidier til slik teknologi. (IEA 2000, Stern 2006).

Å støtte ethvert prosjekt som ikke kan konkurrere i dag, men som har et marginalt læringspotensial vil imidlertid være både svært kostbart og risikofyllt. Læringsraten og funksjonen $\lambda(G)$ kan hjelpe til med å finne de teknologiene det vil være hensiktsmessig å større. En høy læringsrate, som gir en svært avtagende funksjon for mengden arbeidskraft i bruk, vil si at det er mer fornuftig å subsidiere teknologien enn når man har en lav læringsrate. Hvordan disse støttetiltakene er blitt designet, og bør designes, kommer oppgaven tilbake til i kapittel 5.

Arrow påpeker også selv begrensninger i sin modell. Den antar at læring ene og alene oppstår som et biprodukt av produksjon. Modellen tar for eksempel ikke hensyn til læring fra utdannings- og forskningsinstitusjoner opprettet av samfunnet. Neste underkapittel presenterer den basismodellen som brukes mest i dag.

2.2 Basismodellen for erfaringskurver

Som vist hos Wright, kan basismodellen for læringskurver fremstilles slik:

$$(2.15) L = L_0 * x^{-b}$$

Der L er antall arbeidstimer som trengs for å produsere den x . enheten, L_0 er antall arbeidstimer som trengs for å produsere den første enheten, x er akkumulerte enheter produsert og b er en parameter som måler hvordan antall arbeidstimer endrer seg i det akkumulerte enheter produsert øker.

Den originale læringskurven fokuserte imidlertid utelukkende på kostnadsutviklingen til individuelle innsatsfaktorer i produksjonen. Senere lanserte Boston Consulting Group (Boston Consulting Group 1968) en bredere definisjon der de så på sammenheng mellom totale kostnader per enhet og økt akkumulert produksjon. Denne sammenheng ble kalt erfaringskurver og utvidet kostnadsbegrepet. Arbeidskraften inngår kun som en del av det fullstendige kostnadsbildet. Erfaringskurvene inkluderer for eksempel også kostnader til FoU, administrasjon, salg og markedsføring. Slik inkluderes også effekter fra

prosessforbedringer som ikke er direkte relatert til den enkelte arbeiders læring.

Erfaringskurvene tar også med kostnadsfall som stammer fra kontinuerlige forbedringer i organisering og teknologi som resultat av erfaring ved produksjon. Erfaringskurvens helning måler altså den marginale innovasjonen som finner sted hos en teknologi ved repetert produksjon. Maskinene blir for eksempel påvirket av erfaring ved tekniske forbedringer eller substituering av nye og bedre maskiner. Dette er forbedringer som kommer i tillegg til den enkelte arbeiders læring.

Følgende sammenheng har vist seg å være en god statistisk beskrivelse av erfaringskurver (IEA 2000 s.10), og er den vanligste fremstillingen av basismodellen for erfaringskurver i litteraturen:

$$(2.16) K(t) = K_0 * x(t)^{-E}$$

Notasjon:

$k(t)$ – kostnaden per enhet ved tidspunkt t

$x(t)$ – akkumulert produksjon ved tidspunkt t

K_0 – enhetskostnad når $x(t)$ er lik 1

E – graden av læring

For å få en lineær sammenheng blir uttrykket satt på logaritmisk skala:

$$(2.17) \ln k(t) = \ln K_0 - E * \ln x(t)$$

Ulempen ved denne fremstillingen er at den avtagende effekten av erfaring ikke kommer særlig godt frem. Det kan se ut som om kostnadsfallet vil fortsette for alltid. Fordi skalaen er logistisk vil det imidlertid bli vanskeligere å bevege seg utover kurven etter hvert som produksjonen øker. I virkeligheten vil det ikke være mulig å komme helt ut til høyre på x-

aksen. Fordelen ved denne fremstillingen er at skift i kurven, som følge av teknologiske gjennombrudd, kommer lettere frem.

Helningen til en slik lineær erfaringskurve blir gitt ved det som kalles progresjonsraten (PR). Progresjonsraten uttrykker fallet i enhetskostnader ved en dobling av akkumulert produksjon:

$$(2.18) \quad PR = \frac{[K_0 * (2x(t))^{-E}]}{K_0 * x(t)^{-E}} = 2^{-E}$$

Hvis progresjonsraten er lik 1, er kostnadene uendret etter dobling av akkumulert produksjon og erfaringskurven er helt horisontal. For eksempel vil en progresjonsrate på 70 prosent bety at enhetskostnadene synker med 70 prosent etter en dobling av akkumulert produksjon.

Læringsraten (1-PR) er et annet begrep som direkte utledes av progresjonsraten. En læringsrate på 0,3 betyr at enhetskostnadene synker med 30 prosent hver gang total produksjon dobles. Hvis myndighetene bruker erfaringskurver i sitt beslutningsgrunnlag, bør teknologier med relativt høy læringsrate (lav progresjonsrate) i utgangspunktet prioriteres når midler skal fordeles. I det følgende nevnes imidlertid en rekke grunner til å være mer kritisk ved bruk av erfaringskurver.

2.3 Driverne bak kostnadsfall og kritikk av erfaringskurver

Det eksisterer mye litteratur om erfaringskurver og disse blir ofte brukt i planleggings- og strategiarbeidet til teknologiintensive industrier. Det anbefales (IEA 2000, s.114) at erfaringskurvekonseptet også i større grad bør brukes i utformingen av offentlig energipolitikk. Likevel er erfaringskurvene ikke mer enn en observert korrelasjon mellom kostnader og akkumulert produksjon, og kan ikke anses som en etablert teori eller metode. (Neij 1997). Bak den enkle sammenhengen skjuler det seg en komplisert prosess som ikke er lett å beskrive teoretisk. Erfaringskurven sier ingenting om årsakene til kostnadsfallet og vil også inkludere effekter som ikke er direkte knyttet til erfaring ved gjentatt produksjon. Tilbakemelding fra brukere, forsterket integrering og bedre spredning av kunnskap internt i bedriften er eksempler på erfaringseffekter som gir kontinuerlige forbedringer i produksjonen etter hvert som akkumulert produksjon øker. Eksempler på faktorer som påvirker enhetskostnadene uten direkte å ha en sammenheng med akkumulert produksjon er

endring i produksjonsenhetens størrelse, skalaeffekter, forskning og utvikling og generell teknologisk utvikling.

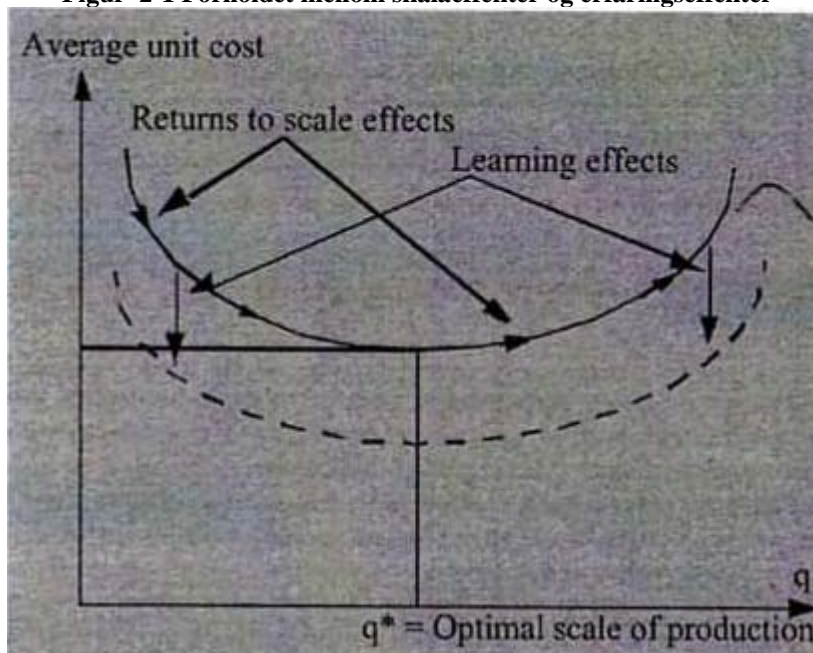
Basismodellen som ble presentert ovenfor er fortsatt den mest brukte funksjonsformen selv om den stammer fra første halvdel av det forrige århundret. Lærings- og erfaringseffekter er ikke spesielt godt utviklet innen økonomifaget og ”remains in the periphery of their (økonomers) literature”(Hall and Howell 1985 s.197). Modellen og funksjonsformen har altså ikke utviklet seg nevneverdig siden Arrow inkluderte læringseffekter i sin vekstmodell.

På grunn av konseptets enkle form og tilhørende ”svart boks”-problematikk advares det derfor (IEA 2000, Clarke et al 2006 s.580, Joskow and Rose 1985 s.8) mot å bruke erfaringskurvene ukritisk. Det er nødvendig med en viss teoretisk innsikt og kunnskap om driverne bak kostnadsreduksjoner for å kunne bruke konseptet riktig. I de følgende underkapitlene presenteres derfor andre dominerende effekter som driver kostnadsfall, og hvordan disse kan henge sammen med og skilles fra erfaringseffekter.

2.3.1 Skalaeffekter

Skalaeffekter er en av effektene som ikke er direkte knyttet til akkumulert produksjon, men heller til produksjonsvolumet på et gitt tidspunkt. Skalaeffekter defineres som effekten på produksjonsnivå av relativ økning i innsatsfaktorer. Skalaeffekten er ofte tiltakende ved lavt produksjonsnivå og avtagende i det man oppnår et høyere produksjonsnivå slik at man i et diagram med gjennomsnittskostnader på den ene akse og produksjonsskala på den andre vil få en u-formet kurve (Isoard og Soria 2001, figur 1, s.623):

Figur 2-1 Forholdet mellom skalaeffekter og erfaringseffekter



I figuren viser den loddrette aksene gjennomsnittlige enhetskostnader mens den horisontale aksene viser produksjonsnivå på et gitt tidspunkt. Mens skalaeffektene beveger seg langs enhetskostnadskurven i figuren, gir erfaringseffektene et negativt skift i kurven. Det er fordi akkumulert produksjon forandres uavhengig av dagens produksjonsnivå. Læringseffekter er dermed langsiktige og skalaeffekter kortsiktige.

Hall and Howell (1985) har i sin kritikk av erfaringskurver som strategisk verktøy blant annet sett på en rekke studier som prøver å skille mellom erfarings- og læringseffekter og skalaeffekter. Disse studiene bruker både en variabel for akkumulert produksjon og en variabel for dagens produksjon for å skille de to effektene. Konklusjonen deres er at kostnadsfallet har minst like stor sammenheng med dagens produksjon som med akkumulert produksjon.

Om det er skalaeffekter eller erfaringseffekter som fører til kostnadsfall bør ha konsekvenser for politikken. Det kan være hensiktsmessig å støtte produksjon som gir erfaring, og dermed lavere kostnader i fremtiden⁴. Skalaeffekter får kun konsekvenser for kostnadene her og nå og er ikke til nytte for noen andre enn produsenten. Å subsidere en bedrift for å skalere opp produksjon er derfor ikke hensiktsmessig.

⁴ Mer om dette i kapittel 5.

2.3.2 Forskning og utvikling

Den mest dominerende mekanismen i de første fasene for nyvinninger er forbedringer som kommer fra forskning og utvikling (FoU). For å skille erfaring fra FoU kan man si at kostnadsreduksjon ved erfaring kommer som et gratis biprodukt av akkumulert produksjon mens det må settes av penger for å få kostnadsreduksjon fra FoU. Samtidig er disse to mekanismene nært knyttet sammen og kan anses som komplementære slik at skillet ikke er særlig skarpt. Utbyttet av forskningen vil for eksempel ofte bli større hvis man samtidig kan høste erfaring fra produksjon.

I tillegg kan man skille mellom ulike typer FoU. Offentlig FoU vil i større grad være en eksogen faktor som ikke påvirkes av markedet og akkumulert produksjon, mens privat FoU vil ha sammenheng med akkumulert produksjon.

Selv om det er vanskelig å anslå hvor stor andel av progresjonsraten som skyldes ulike effekter finnes det eksempler på enkle tofaktormodell som skiller FoU fra erfaring (Bahn og Kypreos 2003, s337):

$$(2.19) \quad SC_{k,t} = a * CC_{k,t}^{-b} * CRD_{k,t}^{-c}$$

SC står her for spesifikk enhetskostnad, CRD for akkumulerte FoU-kostnader, og CC for akkumulert kapasitet.

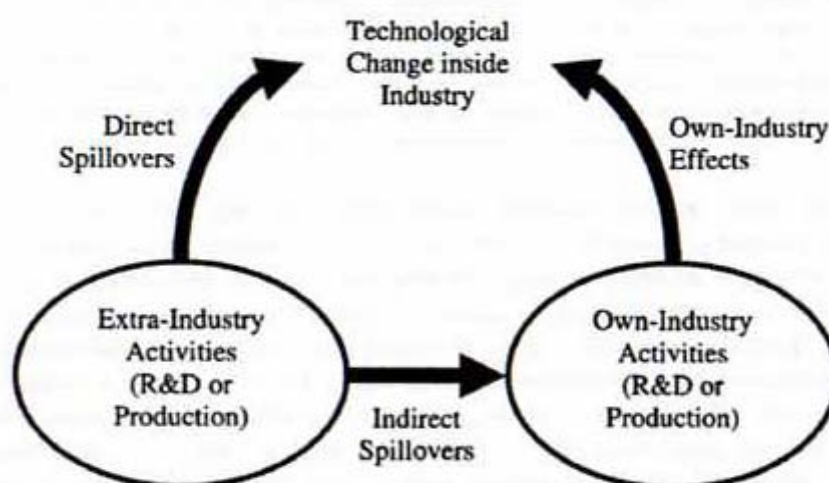
2.3.3 Spillovereffekter

En tredje viktig årsak til kostnadsfall hos en teknologi eller innen en industri kan også være det man kaller spillovere. Spillovere er en betegnelse som brukes om mange ulike typer kunnskaps- og kompetanseoverføring, men her gjengis en generell definisjon som er hentet fra Clarke et al (2006, s582):

Teknologisk endring i et firma, en industri, et land eller et teknologidomene som stammer fra innovasjon i et annet firma, en annen industri, et annet land eller et annet teknologidomene.

Clarke et al (2006) identifiserer FoU, learning-by-doing og spilloverer som de tre mest fremtredende faktorene bak teknologisk endring. FoU og erfaring ved produksjon (kalles learning-by-doing) er aktiviteter som faktisk leder til den teknologiske endringen som gir kostnadsreduksjon. Graden av spillover angir hvor mye for eksempel en enkelt industri vil kunne nyttiggjøre seg av teknologisk endring som kommer fra FoU eller erfaring ved produksjon i andre industrier. Disse spilloverne kan være både direkte og indirekte. Dette kan forklares ved hjelp av figuren under (Clarke et al 2006, s.583):

Figur 2-2 Direkte og indirekte spilloverer



Tas det utgangspunkt i industrinivå vil teknologisk endring enten oppstå på grunn av aktivitet i egen industri, eller komme ved adopsjon av fremskritt fra aktivitet i andre industrier. Dette vil være en direkte spillover. Når aktiviteten i egen industri øker fordi aktivitet i en annen industri legger bedre til rette for egen aktivitet, kalles det indirekte spillover.

Det er viktig å skille mellom spillover som kommer utenfra industrien og spillover mellom bedrifter. I oppgavens avsluttende kapittel viser oppgaven at spillover mellom bedrifter innen en industri har mye å si for om oppstartsbedrifter skal få subsidier til produksjon eller ikke. Kommer spillover utenfra industrien vil ikke politikk rettet mot denne industrien gi utslag på kostnadene. Dette fordi aktiviteten som førte til kostnadsreduksjonene ikke påvirkes av industriens egen produksjon. Et engangs teknologisk gjennombrudd i en annen industri kan gi store kostnadsfall i en annen industri. Det gir imidlertid ikke grunnlag for å

anta like store kostnadsfall i takt med videre produksjon. I oppgavens modell antas hundre prosent spillover mellom bedrifter, og null prosent spillover mellom industrier.

Spillovere forekommer både på tvers av landegrenser eller mellom firma innen en industri. Hvis man ser på et produkt vil graden av spillover ofte variere fra komponent til komponent. IEA (2000) foreslår for eksempel at lokal læring vil være viktigst for netttforbindelse og fundament hos vindmøller. Akkumulert produksjon på verdensbasis har for disse komponentene lite å si, fordi det er vanskelig å spre denne typen læring og erfaring over lande- eller firmagrenser. Turbinene vil derimot være gjenstand for mer global læring med stor grad av spillover i et stadig mer globalisert marked. Når to undersystemer har så ulike læringsmekanismer må analytikeren behandle de to systemene separat. Hvis det finnes et stort internasjonalt læringsystem med et globalt prisnivå, vil analysen av undersystemer, for eksempel et land, gi feil progresjonsrater. Dette skjer fordi den nasjonale veksten i produksjon eller kapasitet ikke matcher den globale.

Subsidier blir ofte gitt på grunnlag av de positive eksternalitetene som oppstår ved store spillovereffekter. Forskere er enige om at det er betydelig spillover ved FoU, men det finnes få empiriske undersøkelser som viser graden av spillover ved erfaring (Gielen et al 2003). Arrow antar i sin artikkel (Arrow 1962) at det er 100 prosent spillover ved læring.

I dag brukes ofte såkalte bottom-up-modeller for å finne de energiteknologiene som minimerer kostnader. Disse endogeniserer ofte teknologisk endring i form av erfaringskurver som modelleres med én av de to ekstreme: 0 prosent eller 100 prosent spillover (Wahlquist 2007). Dette er sjelden eller aldri konsistent med virkeligheten. En modell med hundre prosent spillover vil argumentere for langt større produksjonssubsidier enn det som er optimalt.⁵

De fleste grønne teknologier utvikles internasjonalt og dette gjelder også i stor grad når det gjelder vindkraft. For et lite land som Norge er det da viktig å være oppmerksom på om læringen skjer globalt eller lokalt. Hvis det allerede er produsert 10 000 eksemplarer av en komponent på verdensbasis vil et norsk selskap i liten grad kunne påvirke

⁵ Kapittel 5 diskuterer subsidier og politisk rammeverk med utgangspunkt i erfaringskurver.

kostnadsutviklingen. En dobling fra 50 til 100 enheter i den norske produksjonen vil ikke redusere kostnadene tilsvarende den globale progresjonsraten. Når teknologien vokser raskere internasjonalt enn hjemme, vil kostnadsfall hos den norske produsenten komme på grunn av spillovereffekter, og ikke på grunn av egen erfaring med produksjon.

2.3.4 Definisjon av enheter

Både på grunn av spillovere, men også på grunn av ulike definisjoner på enhetene akkumulert produksjon og kostnad, bør man være forsiktig når man tolker progresjonsrater. Fordi man sjelden har tilstrekkelig informasjon om kostnader brukes ofte pris som et tilnærmet kostnads mål. For en umoden teknologi er det imidlertid sjelden fri konkurranse i markedet, og pris og kostnad blir ikke lik. En artikkel om erfaringskurver for LNG- fabrikker fant at større konkurranse i markedet, og ikke kostnadsfall, var hovedårsaken til at prisene falt (Greaker og Sagen 2008).

Spesielt når man sammenligner eller setter sammen erfaringskurver fra ulike læringssystem er definisjonene viktig. Sammenligning av progresjonsrater for to erfaringskurver, der den ene måler akkumulert erfaring i antall enheter mens den andre måler akkumulert erfaring i antall kWh produsert, er for eksempel ikke mulig.

Junginger (2005, s. 56) fant fire forskjellige erfaringskurver for vind ved litteratursøk.

Tabell 2-1 Fire typer erfaringskurver

	X-aksen(akkumulert mengde)	Y-aksen(kostnader)
1	Akkumulert kapasitet installert (kW)	Kapasitetspris (€kW)
2	Akkumulert mengde kWh produsert	Elektrisitetspris (€kWh)
3	Akkumulert kapasitet installert (kW)	Elektrisitetspris (€kWh)
4	Akkumulert mengde vindturbinenheter installert	Elektrisitetspris (€kWh)

Erfaringskurve type 4 som ble brukt i en studie av EWEA og Greenpeace i 2002 viser en initial progresjonsrate på 85 prosent. Dette vil altså tilsi at kostnadene var 85 prosent av de opprinnelige kostnadene etter akkumulert produksjon. Ved å bruke de samme dataene fra denne studien til å finne progresjonsrater for typene 1, 2 og 3, får man imidlertid

progresjonsrater som gir lavere kostnadsfall etter dobling av akkumulert produksjon. For type 1 og 3 fant man en progresjonsrate på 90,5 prosent, og for type 2 ble den på 94 prosent. Et erfaringsystem er også ofte et sammensatt system av flere undersystemer. Junginger (Junginger 2005, s.55) finner for eksempel at turbinkostnadene utgjør 65-85 prosent av totale installasjonskostnader for en vindpark. "Læringssystemet for vindturbiner" er altså et undersystem av "læringssystemet for vindparker" som også blant annet inkluderer kostnader til fundament og lokal nettforsyning. Men kostnadene ved elektrisitetsproduksjon fra vindkraft inkluderer også andre kostnader. "Læringssystemet for vindparker" og "læringssystemet for vindturbiner" er begge undersystemer av "læringssystemet for elektrisitet fra vind". Dette siste læringssystemet tar også med for eksempel kostnader til drift og vedlikehold samt rentekostnader. Hvert av de tre læringssystemene karakteriseres av en erfaringskurve.

Som eksempelet fra Junginger viser, vil en oppdeling av læringssystem i ulike undersystemer, eller endring i parametere, gi store utslag ved sammenligning av progresjonsrater. Denne oppgaven studerer derfor en ny måte å dele opp en teknologienhet i flere komponenter. Neste kapittel utleder en matematisk modell og viser noen resultater. Disse vil være svært interessante for en ny teknologi med varierende grad av erfaring på de forskjellige komponentene.

3 En modell for dekomponering av erfaringskurver

Utfordringen ved å se på kostnadsutviklingen hos en teknologi som har kort produksjonshistorie, eller som enda ikke har kommet i produksjon, er at man ikke har data tilgjengelig for å lage en erfaringskurve som direkte kan brukes på den spesifikke teknologien. Det brukes ofte generelle erfaringskurver fra lignende industri for å fremskrive det potensielle fremtidige kostnadsfallet hos den spesifikke teknologien. For flytende vindturbiner brukes generelle erfaringskurver for landfaste og fast forankrede offshore vindturbiner.

Vår modell vil dekomponere erfaringssystemet til flytende vindmøller i undersystemer. Det er nemlig ikke naturlig at ulike komponenter hos flytende vindturbiner vil ha samme mengde erfaring ved produksjonsstart. Potensialet for læring vil variere ut i fra hvor mye som allerede er produsert av hver enkelt komponent på verdensbasis. Det er for eksempel kjent at det allerede er produsert en mengde rotor og turbiner på verdensbasis. Å produsere 100 nye rotor vil da ikke ha spesielt mye å si for kostnadsutviklingen. Det er fordi 100 enheter da utgjør en forsvinnende liten andel i forhold til samlet mengde akkumulert produksjon.

Å subsidiere den norske produksjonen med en begrunnelse om at kostnadene vil falle markant i en oppstartfase vil da kunne være feilslått politikk (se nærmere kapittel 5). Derfor ønsker oppgaven å finne ut hvor langt ut på erfaringskurven flytende vindturbiner vil befinne seg ved produksjonsstart. Modellen som settes opp i dette kapittelet vil brukes i scenarioanalysen i det empiriske kapittelet. Med ulike forutsetninger om tidligere produksjonserfaring for de ulike komponentene finner analysen ved hjelp av den følgende modellen mulige forventede progresjonsrater. Jo lavere denne er, og jo høyere læringsraten er, jo mer hensiktsmessig vil det være å subsidiere de flytende vindmøllene.

3.1 Formulering og notasjon

Fordi total kostnadene hovedsakelig består av kapitalkostnader forenkles det slik at total kostnader er lik kapitalkostnader: $C_n^i = X_n^i$

Investeringen skrives ned over t år, der t er det tidspunktet hvor vindmøllen ikke lenger produserer kraft. Effektiviteten til vindmøllen er den samme i alle tidsperioder frem til tidspunkt t .

Initial brukerpris for en komponent per år kan da skrives på denne måten: $X_n^i = \theta x^i$

$$(3.1) \theta = \frac{(1+r)^t}{t}$$

r - rentenivå som angir alternativkostnaden ved å ikke sette de investerte pengene i banken

t - komponentens antatte levetid

x - kapitalkostnad i år 0 for komponent i

n - produksjonsnummer for hele teknologien

i - komponentnummer

Her brukes en enkel antagelse om at flytende vindmøller kan deles inn i to hovedkomponenter. Disse er eksempelvis vindmøllekroppen (komponent 1) og rotoren/generatoren (komponent 2). I det siste kapittelet (kapittel 5) analyseres tre scenarier med ulik grad av erfaring i sine fire komponenter.

Her antas det at det ikke er produsert noe av vindmøllekroppen tidligere. Komponent 1 befinner seg dermed helt på starten av erfaringskurven i det selskapet starter produksjonen av flytende vindmøller. Det antas videre at det allerede er blitt produsert en rekke lignende rotoror fra før av, og at komponent 2 dermed allerede befinner seg et stykke ned på erfaringskurven.

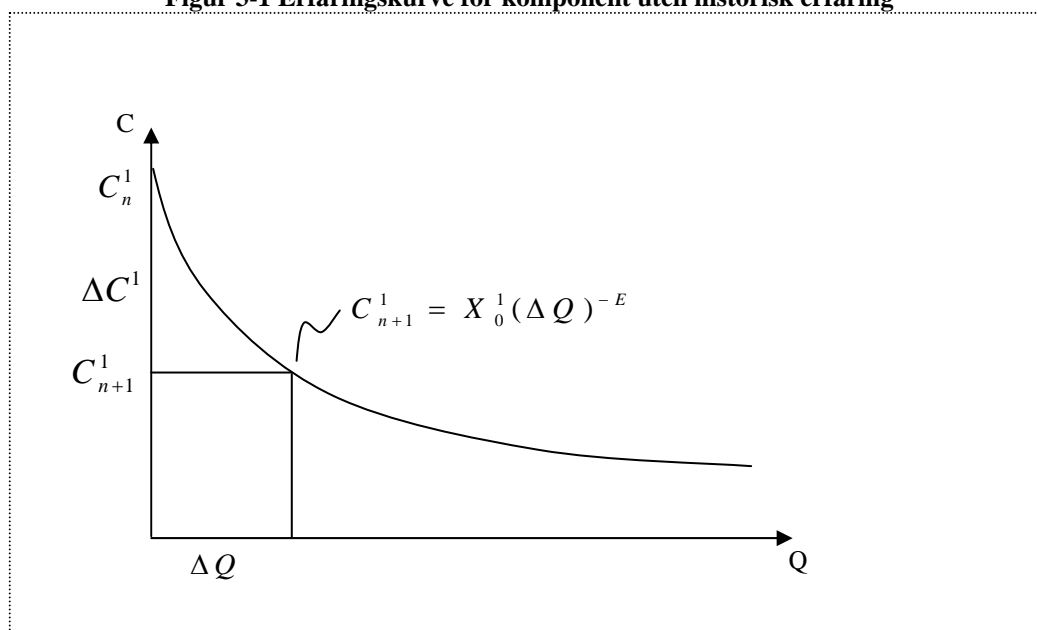
Q_n^i - akkumulert produksjon

Vi ser bort i fra produksjon av komponent 2 i resten av verden etter produksjonsstart for vindmøllene. Produksjon i resten av verden vil uansett ikke påvirkes av norsk politikk. Dermed er tillegget i akkumulert produksjon for de to komponentene det samme etter produksjonsstart for de flytende vindmøllene:

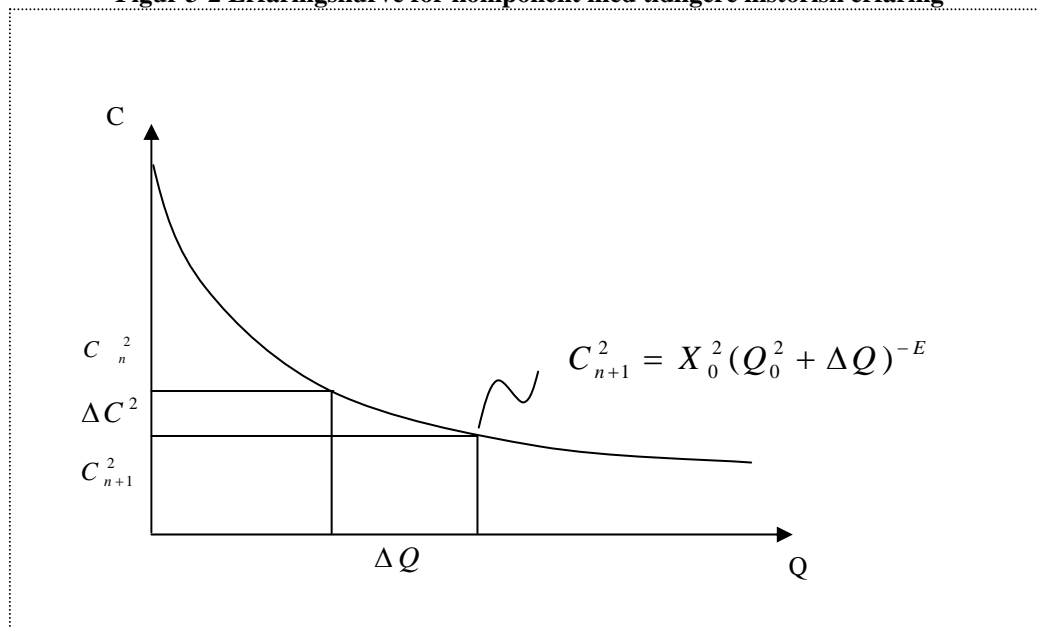
$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 = \Delta Q$$

For å illustrere hvordan kostnadsfallet for hver komponent per nye produserte vindmølle vil være avhengig av tidligere akkumulert produksjon settes det opp to figurer. Den første figuren viser hvor komponent 1 befinner seg på erfaringskurven, og hvor stort kostnadsfall man kan forvente seg hos komponenten ved et gitt produksjonstillegg (ΔQ). Den andre figuren viser hvor komponent 2 befinner seg på erfaringskurven, og hvor stort kostnadsfall man kan forvente seg hos denne komponenten ved det samme tillegget i produksjon (ΔQ).

Figur 3-1 Erfaringskurve for komponent uten historisk erfaring



Figur 3-2 Erfaringskurve for komponent med tidligere historisk erfaring



Figurene viser tydelig at kostnadsfallet, ΔC^i , for en gitt økning i akkumulert produksjon, ΔQ , blir mindre jo høyere historisk produksjon, Q_0^i , har vært. ΔC^1 er mye større enn ΔC^2 selv om produksjonen har økt med den samme mengden. Dette skjer fordi komponent 2 befinner seg lenger ut på erfaringskurven når produksjonen starter. Q_0^2 angir hvor mye av komponent 2 som er produsert før produksjonsstart for hele teknologienheten. Denne produksjonen har allerede gitt komponent 2 så mye erfaring at potensialet for å lære mer er mindre. Ved det samme tillegget i akkumulert produksjon, vil ikke kostnadene hos denne komponenten synke like mye som kostnadene hos komponent 1.

3.2 Noen resultater

Det er også mulig å vise det samme analytisk. Erfaringskurveformelen som ble introdusert i kapittel 2 brukes her, men nå med en litt annen notasjon:

$$(3.2) \quad C_n^i = X_0^i (Q_n^i)^{-E}$$

E – læringsfaktor

X_0^i - initial kostnad for komponent i

Q_0^i - historisk produksjon før produksjonsstart for flytende vindmøller

$Q_0^i + \Delta Q$ - total produsert mengde av komponent i

For å vise endringen i kostnader trekkes formelen for kostnad ved vindmøllegenerasjon n fra kostnaden ved vindmøllegenerasjon n+1:

$$(3.3) \Delta C^i = C_{n+1}^i - C_n^i$$

$$(3.4) \Delta C^i = X_0^i (Q_0^i + \Delta Q)^{-E} - X_0^i (Q_0^i)^{-E} = -X_0^i \left[(Q_0^i)^{-E} - (Q_0^i + \Delta Q)^{-E} \right] < 0$$

Kostnadene blir altså mindre i det produksjonen øker. Fordi uttrykket i parentes blir positivt blir hele uttrykket negativt.

For å vise hvordan kostnadsendringen er avhengig av tidligere produksjon deriveres endringen i C med hensyn på tidligere produksjon:

$$(3.5) \frac{\partial \Delta C^i}{\partial Q_0^i} = E * X_0^i (Q_0^i)^{-E-1} - E * X_0^i (Q_0^i + \Delta Q)^{-E-1}$$

$$= E * X_0^i \left[\frac{1}{(Q_0^i)^{1+E}} - \frac{1}{(Q_0^i + \Delta Q)^{1+E}} \right] > 0$$

Fordi $E > 0$ og $X_0^i > 0$ og det første uttrykket i parentes må være større enn det andre blir uttrykket i sin helhet positivt.

Resultat 1: Kostnadsfallet for en gitt økning i akkumulert produksjon blir mindre jo høyere historisk produksjon har vært.

Dette viser at det ikke kan forventes store kostnadsfall hos turbinene til de flytende vindmøllene hvis disse allerede er blitt produsert i stor skala på verdensbasis.

Det er også ønskelig å vise hvordan variasjon i hver komponents andel av totalkostnadene i dag vil påvirke hele vindmøllens forventede læringsrate. Om det ikke er tidligere erfaring fra produksjon hos en teknologi, brukes tidligere oppnådde progresjonsrater for lignende teknologier for å finne en forventet progresjonsrate og læringsrate. For vindkraft brukes ofte en læringsrate på 0,125.⁶ Det vil si at man tenker seg at de totale kapitalkostnadene for hele vindmøllen vil være 87,5 prosent av de opprinnelige kostnadene etter dobling av akkumulert produksjon. Dette vil kun være en hypotetisk eller forventet læringsrate som baserer seg på informasjon fra historisk produksjon. Hvis man vet at noen av komponentene til en flytende vindmølle allerede er produsert i mange eksemplarer vil man imidlertid forvente seg at mye av læringspotensialet kan være "brukt opp". Dermed vil den forventede lærings- og progresjonsraten også endre seg, og nærme seg henholdsvis 0 og 1. Her utvikles først et uttrykk for den forventede læringsraten. Denne gis betegnelsen α .

En ny formel for utviklingen i enhetskostnadene for hele teknologienheten settes først opp:

$$(3.6) C_N = C_0 * Q_N^{-\alpha}$$

α - forventet læringsrate for hele teknologienheten

Enhetskostnadene for hele teknologienheten kan også skrives som summen av kostnadene for hver komponent:

$$(3.7) C_N = X_n^1 + X_n^2$$

Hvordan brukerprisen vil utvikle seg i fremtiden er avhengig av hvor stor andel av kostnadene de ulike komponentene utgjør i dag. Ved å bruke observerte initialkostnader for komponent 2 og tidligere akkumulert produksjon for komponent 2 finner man kostnaden til komponent 2 i dag.

⁶ Se vedlegg 8.2

$$(3.8) X_1^2 = X_0^2(Q_0^2)^{-E}$$

Notasjon:

X_1^2 - kostnaden til komponent 2 ved produksjonsstart av denne teknologien ("i dag")

X_0^2 - kostnaden til komponent 2 første gang den ble produsert

Q_0^2 - historisk akkumulert produksjon av komponent 2 før produksjonsstart for denne teknologien ("i dag")

$X_0^1 = X_1^1$ - kostnaden til komponent 1 ved produksjonsstart for denne teknologien. Denne er lik kostnaden til komponent 1 første gang den ble produsert fordi dette er "i dag".

Kostnadene ved produksjonsstart i dag kan dermed uttrykkes:

$$(3.9) C_{I_dag} = X_0^1 + X_0^2(Q_0^2)^{-E}$$

Kostnadene ved produksjon av den N-te vindmøllen kan uttrykkes:

$$(3.10) C_N = X_0^1 Q_N^{-E} + X_0^2 (Q_0^2 + Q_N)^{-E}$$

Fordi $X_0^1 = X_1^1$ blir dette det samme som:

$$(3.11) C_N = X_1^1 Q_N^{-E} + X_0^2 (Q_0^2 + Q_N)^{-E}$$

For å få uttrykket for X_1^2 , kapitalkostnad for komponent 2 ved produksjonsstart, som oppgis i (3.8) inn i uttrykket for C_N , kan $(Q_0^2)^{-E}$ og $(Q_0^2)^E$ ganges med X_0^2 . Dette er mulig fordi $(Q_0^2)^{-E} * (Q_0^2)^E = 1$. Da kan C_N uttrykkes:

$$(3.12) C_N = X_0^1 Q_N^{-E} + X_0^2 (Q_0^2)^{-E} (Q_0^2 + Q_N)^{-E} (Q_0^2)^E$$

Bruker (3.8) som sier at $X_1^2 = X_0^2 (Q_0^2)^{-E}$, og forenkler til:

$$(3.13) C_N = X_1^1 Q_N^{-E} + X_1^2 (Q_0^2 + Q_N)^{-E} (Q_0^2)^E$$

Setter (3.6) og (3.13) sammen for å finne et uttrykk for α :

$$(3.14) C_0 * Q_N^{-\alpha} = X_1^1 Q_N^{-E} + X_1^2 (Q_0^2 + Q_N)^{-E} (Q_0^2)^E$$

\Rightarrow

$$(3.15) \alpha = \frac{\ln C_0}{\ln Q_N} - \frac{\ln [X_1^1 Q_N^{-E} + X_1^2 (Q_0^2 + Q_N)^{-E} (Q_0^2)^E]}{\ln Q_N}$$

Ligning (3.15) gir et uttrykk for den forventede læringsfaktoren, og er en viktig ligning. Jo høyere denne er, jo større kostnadsfall per tillegg i akkumulert produksjon forventes. Jo større uttrykket i den andre brøkstreken er, jo lavere vil den forventede læringsfaktoren være, og jo mindre vil kostnadsreduksjonene for et tillegg i akkumulert produksjon bli.

Læringsfaktoren avhenger altså av teknologiens totale initiale kostnader, akkumulert produksjon etter produksjonsstart i forhold til historisk produksjon, og av den opprinnelige læringsfaktoren. Når Q_0^2 øker i forhold til Q_N blir det andre uttrykket på høyre side av ligningen større slik at læringsfaktoren blir mindre.

For å se på endringen i andel av kapitalkostnader innfører vi variabelen ΔX . Det trekkes fra like mye kostnader i komponent 1 som legges til hos komponent 2. Det vil si at andelen av kostnadene som kommer fra komponenten med tidligere historisk erfaring øker. Samtidig holdes de totale initiale kostnadene konstante.

$$(3.16) C_N = (X_1^1 - \Delta X) Q_N^{-E} + (X_1^2 + \Delta X) (Q_0^2 + Q_N)^{-E} (Q_0^2)^E$$

Den forventede læringsfaktoren kan da uttrykkes:

$$(3.17) \alpha = \frac{\ln C_0}{\ln Q_N} - \frac{\ln \left[(X_1^1 - \Delta X) Q_N^{-E} + (X_1^2 + \Delta X) (Q_0^2 + Q_N)^{-E} (Q_0^2)^E \right]}{\ln Q_N}$$

For å forenkle brukes at $(Q_0^2 + Q_N)^{-E} (Q_0^2)^E \approx 1$ når $Q_0^2 \gg Q_N$ ⁷.

$$(3.18) \alpha = \frac{\ln C_0}{\ln Q_N} - \frac{\ln \left[(X_1^1 - \Delta X) Q_N^{-E} + (X_1^2 + \Delta X) \right]}{\ln Q_N}$$

For å se hvordan endringen påvirker læringsfaktoren, deriveres læringsfaktoren med hensyn på endringen i kapitalkostnad hos de to komponentene:

$$(3.19) \frac{\partial \alpha}{\partial \Delta X} = - \left(\frac{1}{\ln Q_N} \right) \left(\frac{1 - Q_N^{-E}}{(X_0^1 - \Delta X) Q_N^{-E} + (X_1^2 + \Delta X)} \right) < 0$$

Fordi uttrykkene over og under brøkstreken må være positive blir hele uttrykket negativt. Den hypotetiske erfaringsfaktoren blir altså mindre hvis andelen av den komponenten med tidligere erfaring øker.

Resultat 2: Når andelen av kapitalkostnader fra den komponenten med høyest historisk produksjon øker vil erfaringspotensialet hos den flytende vindmøllen bli mindre.

Hos en flytende vindmølle vil turbinene stå for relativt stor andel av kapitalkostnadene. Turbinene er også en av komponentene hvor man allerede har mye erfaring. Ut i fra dette resultatet kan man altså tenke seg at den forventede læringsraten vil være lavere enn den generelle læringsraten for vindkraft. I det følgende kapitlet presenteres den informasjonen det har vært mulig å skaffe til veie om kostnader, kostnadsfordelinger, forventede læringsrater og tidligere historisk produksjon av de ulike komponentene. Denne informasjonen brukes til slutt for å avdekke hvordan ulike forutsetninger vil påvirke de fremtidige kostnadene for flytende vindmøller.

⁷ >> betyr "mye større enn"

4 Status for utvikling av flytende vindmøller

I dette empiriske kapittelet presenteres en situasjonsrapport for utviklingen av flytende vindmøller i Norge. Både hvordan forholdene ligger til rette globalt, lokalt og i enkeltbedriftene presenteres. I tillegg til diverse rapporter og annet skriftlig materiell er informasjonen basert på mail-, telefon- og møtekontakt med Sjur Bratland; eiendomsansvarlig i Hywind (Bratland 2008), Jan-Fredrik Stadaas; prosjektleder i Hywind (Stadaas 2008), Jahn Olav Tande; seniorforsker SINTEF energiforskning (Tande 2008a og 2008b), Michael Førland; finansdirektør i Sway (Førland 2008), og Erik Stormyr, Aker Kværner (Stormyr 2008).

4.1 Potensial og aktører

For å unngå tall- og begrepsforvirring er det hensiktsmessig å innlede dette delkapittelet med en oversikt over begrepene som brukes når man måler effekt og energi:

Tabell 4-1 Begreper som brukes om energi og effekt

Målenhet effekt: watt (W)
1 kilowatt (kW) = 1000 W
1 megawatt (MW) = 1000 kW
1 gigawatt (GW) = 1000 MW
1 terrawatt (TW) = 1000 GW
Målenhet energi: watt-time (Wh)
1 TWh = 1000 GWh = 1 milliard kWh

I følge rapporten ”Potensialstudie av havenergi i Norge” som ble utarbeidet på oppdrag for det statlige foretaket Enova (Sweco Grøner 2007), er det fysiske potensialet for offshore vindkraft i Norge på omtrent 14 000 TWh.

I dag ligger Norges samlede kraftproduksjon på rundt 120 TWh. Over 99 prosent av dette kommer fra vannkraft. I følge rapporten til Sweco Grøner er det kun markedet som begrenser utnyttelsen av det enorme kraftpotensialet til havs. Fordi vindkraft anses som en

relativt moden teknologi sammenlignet med tidevannskraft og bølgekraft, anbefaler rapporten å satse på dette. En undersøkelse utført for Statoil Hydro i 2005 identifiserer imidlertid en rekke begrensninger for utnyttelse av markedet (Stadaas 2008). Når man tar hensyn til arktiske soner, ekstreme forhold, lokalisering i forhold til infrastruktur, økologiske soner, skipsleier og mulighetene for å ta i mot strømmen i nettet reduseres dette enorme potensialet med 98 prosent.

Gode og stabile vindforhold er et av hovedargumentene for å videreutvikle teknologien for flytende vindkraft. Vinden holder høyere fart, noe som gir god uttelling for produksjonen fordi en 10 prosents økning i vindstyrke gir 30 prosents økning i generert strøm. Til havs vil man også oppnå en høyere utnyttelsesgrad. Fullasttimer er uttrykket som benyttes for utnyttelsesgrad og måles i årlig energiproduksjon per installerte kapasitetsenhet.

Gjennomsnittlig utnyttelsesgrad for en landfast vindmølle i Tyskland og i Norge er på henholdsvis 2000 og 3000 fullasttimer. Til sammenligning vil en offshore eller flytende vindmølle i Norge kunne ha rundt 4500 fullasttimer i gjennomsnitt (Tande 2008).⁸

I følge tall fra den europeiske vindkraftforeningen var den totale installerte vindkapasiteten i Europa ved utgangen av 2007 på 57 136 MW. Av dette sørget Norge for en total vindkraftkapasitet på 333 MW. Tyskland, Danmark og Storbritannia er de største vindkraftprodusentene. Total offshore vindkapasitet i Europa var på 1079 MW ved utgangen av 2007 (EWEA 2008). På verdensbasis har total installert kapasitet økt fra 7475 MW i 1997 til 93 949 MW ved utgangen av 2007 (WWEA 2008)

I Norge finnes det i dag to aktører som ønsker å kommersialisere kraftproduksjon fra flytende vindmøller. Statoil Hydro sitt prosjekt Hywind skal i hovedsak drive teknologiutvikling, og senere selge konseptet til andre utviklere og produsenter. Det enkeltstående selskapet Sway, som eies 25 prosent av Statoil Hydro, ønsker selv å ha hovedansvaret for vindmølleproduksjonen når teknologien er klar.

Som man ser av tallene for installert kapasitet på verdensbasis har Norge relativt marginalt med erfaring når det gjelder vindkraft. Både eksperter og beslutningstakere håper imidlertid

⁸ Tallene for utnyttelsesgrad for offshore vindkraft i Europa og for landfast vindkraft i Norge er observerte størrelser. For flytende vindkraft er tallet på 4500 fullasttimer kun en forventet og usikker størrelse.

at erfaringen og ekspertisen innen offshore teknologi og konstruksjon vil gi Norge et konkurransefortrinn ved utviklingen av flytende vindturbiner. I perioden 2007-2009 er det for eksempel satt av 18 millioner norske kroner til forskningsprosjektet ”Deep sea offshore wind turbine technology” som er et samarbeidsprosjekt mellom SINTEF i Trondheim, Institutt for energiteknikk på Kjeller og NTNU. Dette er imidlertid småpenger i forhold til hva som må til av investeringer for å nå kommersialiseringsstadiet. Andre viktige premissleverandører for utvikling og kommersialisering av flytende vindkraft i Norge er derfor avgjørende. Nøkkelaktører inkluderer blant annet ScanWind, som er den eneste produsenten av store vindturbiner i Norge, og Owec Towers, som har utviklet teknologi for fundament hos fast forankrede offshore vindturbiner. Aker Solutions, Nexans, Devold, AMT og Umoe er blant de aktuelle norske underleverandørene. Ellers er Statkraft og Lyse dominerende når det gjelder utvikling av vindparker. Statnett spiller en viktig rolle som systemoperatør.

Samtidig går debatten om i hvor stor grad det er nødvendig å bygge ut vindkraft både på land og offshore for å få erfaring med produksjon før det bygges og driftes vindkraft til havs. Mens omkvedet blant mange i kraftbransjen er at ”man må lære å krabbe før man kan gå”, taler andre for å hente ekspertise og erfaring fra andre land slik man gjorde da olje- og gassproduksjonen startet opp i Norge på 70-tallet. (Teknisk ukeblad 2008)

4.1.1 Hywind

Hywind sitt konsept går ut på å sette sammen eksisterende teknologi for å unngå for høye initiale kostnader. Den delen av den flytende vindmøllen som er over vann er allerede standardisert gjennom masseproduksjon. En annen fordel med et slikt konsept er at man kan dra nytte av læring og erfaring i et etablert marked parallelt med egen produksjon.

Hywind sin første demomølle skal på plass utenfor Karmøy i løpet av 2009 og vil ha en kapasitet på 2,3 MW. Kapitalkostnaden vil være på mellom 200 og 300 millioner kroner (Stadaas 2008). Fordi denne kun skal brukes til å høste erfaring, og ikke til kraftproduksjon, er det imidlertid ikke hensiktsmessig å se på pris per kWh.

Hywind bruker en tradisjonell oppstrømssturbin der vingene vrir seg etter vindretningen for optimal utnyttelse. Siemens er leverandør av tårn og turbin for demomøllen og har også inngått en avtale med Statoil Hydro om fremtidig levering og teknologiutvikling.

For å holde vindmøllen på plass brukes det tre slakke ankere. Fordi møllen skal stå på dypt vann, trenger man færre ankere enn der vannet er grunnere. Dermed spares kostnader i forhold til vindmøller som plasseres nærmere kysten.

Hywind opererer med en utviklingsplan der de skal ha opprettet en vindpark knyttet til en oljeplattform rundt år 2015. På dette stadiet skal kostnadene være redusert med rundt 30 prosent. I 2020 skal kostnadene etter planen være tilnærmet konkurransedyktige, og én eller flere vindparker skal være knyttet til land.

4.1.2 Sway

Sway sitt konsept innebærer en mer radikal innovasjon som dermed gir mer risiko for investorer. Sway introduserer blant annet en helt ny turbinteknologi som tillater lettere vekt på hele konstruksjonen. Ved hjelp av simuleringer har Sway funnet at oppstrømssturbiner i den størrelsen som kreves for kommersialisering (fra 5 til opp mot 10 MW) vil kreve for stor vekt på hele vindmøllen.

Sways første demomølle skal på plass utenfor Karmøy i løpet av sommeren 2010 og skal ha en kapasitet på 5 MW. I følge selskapets finansdirektør vil denne demomøllen koste cirka 250 millioner norske kroner (Førland 2008). Sammenlignet med Hywinds kostnadsanslag er det en mulighet for at Sway er relativt optimistiske i sine vurderinger. Sway sin mølle er over dobbelt så stor som Hywind sin mølle hva kapasitet angår, men skal likevel koste omtrent det samme.

Det bør også nevnes at den spesielle typen turbinteknologi som Sway skal bruke ikke finnes på markedet i dag. Nedvindsturbine er konstruert for at vinden skal komme bakfra slik at hele møllen vrir seg etter vindretningen. En avtale om levering av den første nedvindsturbinen vil komme på plass med det tyske selskapet Multibrid i løpet av sommeren 2008. I tillegg til at nedvindsturbinen tillater lavere vekt, kan en enklere type forankring

brukes. Sway sin demomølle skal ha en strekkstagsforankring. Dette er en nyvinning i form av et stivt rør med tykkelse på cirka én centimeter.

Da Sway er et mindre selskap med mer begrenset kapital planlegger de å gå mer direkte til kommersialisering enn Hywind. Demomøllen er på 5 MW fordi dette anses som minimumskapasitet for kommersiell produksjon. Neste fase er en demopark på rundt 25 MW. Installering av denne parken skal starte i 2012 og ferdigstilles innen 2015. I følge planen skal kapitalkostnadene på dette stadiet være halvert i forhold til demomøllens kostnader. I tidsrommet rundt 2016 til 2020 er planen å skalere opp produksjon i andre land.

4.2 utfordringer, begrensninger og erfaringspotensial

Dette underkapittelet ser på de ulike mulighetene for kostnadsreduksjoner, og vurderer om dette er kostnadsreduksjoner som kommer fra lærings- og erfaringseffekter. Til slutt nevnes en rekke andre viktige faktorer som må på plass før flytende vindmøller kan bli en realitet.

Muligheten til å bygge større vindparker til havs enn på land, vil kunne gi kostnadsreduksjoner. Det bygges nå fast forankrede offshore vindparker på 300 MW. I fremtiden tror aktørene at det vil bygges parker på opp mot 1 GW. Disse kostnadsreduksjonene vil komme fra skalaeffekter, og ikke fra erfaring. Kostnadsreduksjoner fra erfaring er derimot mulig når det eksperimenteres med hvordan møllene i en vindpark optimalt skal settes i forhold til hverandre. Når det gjelder lokalisering mer generelt, er det ikke mye gjenstående erfaringspotensial fordi for eksempel bunnforhold, vindforhold, skipsleier og avstanden til land allerede er godt kjent. (Tande 2008a).

Både teknologiutvikling, skala- og erfaringseffekter vil påvirke kostnadene for Hywind og Sway sine forskjellige turbinkonsept fremover. I følge Sway må møllene opp i en størrelse på 10 MW for at kraftproduksjon skal konkurrere med dagens norske kraftpris (Førland 2008). Dermed må turbinene både bli lettere, sterkere og større. I det turbinene blir større, kan kostnadene i første omgang øke, for deretter å synke på grunn av erfaring med produksjon. Kostnadene per MW vil også synke, men mye av dette vil komme fra skala- og ikke erfaringseffekter. En rendyrket offshore turbin har også mulighet til å redusere kostnadene fordi det ikke stilles krav til estetikk eller støynivå. En slik kostnadsredusering

kommer imidlertid fra en eksogen engangseffekt, og gir ikke videre kostnadsreduksjoner knyttet til erfaring fra produksjon.

For den submarine delen, eller ”flyteren”, ser man for seg et stort potensial både for erfarings- og skalaeffekter (Stadaas 2008, Stormyr 2008, Førland 2008). Teknologi for submarine fundament i olje- og gass-sektoren er allerede kjent, men disse er kun blitt levert i spesialdesignede enheter frem til nå. Det er heller ikke laget slike konstruksjoner spesifikt til vindturbiner enda. Verftene Aker Verdal og Rosenberg er to eksempler på leverandører av stålunderstell for olje- og gassindustrien som tidligere kun har drevet med skreddersydde engangsliveranser. Nå ser begge på mulighetene for masseproduksjon av fundament til offshore vindturbiner.

Eksperimentering med materialvalg, både for turbin, tårn og flyter, kan også gi utslag på kostnadene. I dag brukes betong eller stål, men plast og aluminium kan være mer hensiktsmessig for en flytende vindturbin som er mer avhengig av lavere vekt. Om dette gir høyere eller lavere kostnader på kort og lang sikt er for tidlig å si noe om. Det vil både avhenge av teknologiutvikling, og av erfaring med produksjon.

Vedlikeholdskostnadene for offshore vindturbiner ligger i dag relativt høyt og anslås til rundt 20 øre per kWh av en total kostnad på 1 krone per kWh. Utvikling av fjernstyrte kontrollsystemer som opereres fra land kan redusere vedlikeholdskostnadene. Det regnes med at dette hovedsakelig vil komme fra teknologiutvikling, men at erfaring også kan få kostnadene til å falle. Ellers vil det tøffe klimaet påvirke vedlikeholdskostnadene i forhold til installasjoner på land. Høy vindstyrke kan by på problemer samtidig som en jevnere vindstyrke vil gjøre at turbinene utsettes for lavere utmattingskrefter. Klimaets påvirkning endres ikke når akkumulert produksjon øker. Dette er en engangseffekt som ikke har noe med erfaring å gjøre. Installasjonskostnadene vil også være lavere fordi en større del av arbeidet kan gjøres på land før møllene slepes ut på havet.

Foruten at teknologien for selve vindmøllene må utvikles, er det også en rekke faktorer, utenfor teknologiutviklernes direkte kontroll, som er avgjørende. Et lovverk som fungerer utenfor Norges grunnlinje, et konsesjonssystem som fungerer og klarlegging av et langsiktig støtteregime er tre faktorer som etterlyses av Sway og Hywind i dag. Før man kan ta fatt på utbygging av vindparker i stor skala må dette på plass. Samtidig er kanskje den største

utfordringen å få på plass et nett som kan transportere strømmen fra vindmøllene til brukerne. Dette vil kreve store investeringer.

I tillegg til at utnyttelsen av kraftproduksjonspotensialet kan begrenses av nettkapasiteten vil markedet også være en begrensning. Det er en grense for hvor stor andel av krafttilgangen et land kan ha fra vindkraft. I Danmark kommer over 22 prosent av kraften fra vind. Vind kan ikke lagres og vindmøllene kan ikke produsere kraft ved vind som er for sterk eller for svak. Dette gjør kraftsikkerheten i Danmark sårbar.

4.3 Kostnadsfordeling og krav om støtte

Ut i fra informasjon fra Sway og Hywind samt en oversikt over typisk kostnadsfordeling for landfaste vindmøller (EWEA 2008), og intervju med Jahn Olav Tande på Sintef Energiforskning (Tande 2008), er det satt sammen et forslag for hvordan kostnadene grovt sett vil fordele seg mellom de ulike komponentene per i dag.

Hywind:

Turbin 0,57

Tårn 0,24

Flyter 0,12

Anker 0,06

Sway:

Turbin 0,5

Tårn 0,29

Flyter 0,14

Anker 0,07

Det er viktig å legge vekt på at kostnadsanslagene fra aktørene er svært grove. Det har to forklaringer. For det første er kostnadene dyrebare forretningshemmeligheter for selskapene. For det andre hersker det også for selskapene stor usikkerhet rundt de reelle kostnadene. Prisene vil for eksempel mest sannsynlig endre seg i løpet av planleggings- og igangsettingsfasen. De seneste årene har prisene økt betydelig. Årsakene til dette kan være

leverandører med monopol som skrur opp prisene kunstig, men også at høye subsidier i enkelte markeder fører til høy etterspørsel.

Både Sway og Hywind mener de er avhengige av støtte til de første demomøllene de skal produsere. Sway (Førland 2008) mener at manglende støtte til den første demomøllen er den største flaskehalsen. Per dags dato får de 30 prosent støtte fra Enova til den første demomøllen, men mener at støtten må øke til minst 50 prosent. Sway skiller mellom investeringsstøtte og produksjonsstøtte. Etter den første demoparken mener Sway at de ikke trenger investeringsstøtte, men det er under forutsetning om en produksjonsstøtte på 20 øre per kWh.

Investeringsstøtten vil imidlertid også være med i det totale regnestykket på samme måte som produksjonsstøtten. Årlig produksjonsstøtte for en hypotetisk ferdigstilt vindpark på 25 MW med utnyttelsesgrad på 4500 fullasttimer vil med en enhetsstøtte på 20 øre per kWh bli på rundt 22,5 millioner norske kroner. Ganges dette opp med levetiden på 20 år samtidig som man legger til en investeringsstøtte på 50 prosent av 250 millioner kroner blir det totale støttebeløpet på 575 millioner norske kroner. Dette tilsvarer en enhets produksjonsstøtte på 25,5 øre per kWh.

Statoil Hydro er heller ikke fornøyd med den faste støttesummen på 8 øre per kWh til vindkraft i Norge i dag. Siden det ikke finnes kunder som er villige til å betale ekstra for ”grønn” elektrisitet, og fordi det koster såpass mye penger å sette opp én vindmølle, mener Statoil Hydro at subsidier er den eneste måten å finansiere læringen. De anslår sine læringsinvesteringer til å være opp mot 3 milliarder norske kroner, og mener at ingen investorer er villige til å ta på seg så store kostnader (Stadaas 2008). I et brev til olje- og energidepartementet i slutten av april 2008 krever Statoil Hydro en støtte på 1 krone per kWh for flytende vindkraft i fem til ti år fremover. De skriver at; ”dette er nødvendig for å gjøre flytende vindkraft attraktivt i en tidlig fase”.(Dagens Næringsliv, 2008b).

5 Scenario- og rammeverksanalyse med drøfting av resultater

I dette kapitlet følger bakgrunnen for konklusjonen. For å nærme seg et svar på å om flytende vindmøller vil oppnå lønnsomhet, fremstilles en scenarioanalyse. I denne brukes informasjon fra det empiriske kapitlet i modellen fra kapittel 3. Deretter brukes erfaringskurvene som bakgrunn for en diskusjon rundt samfunnsøkonomisk og bedriftsøkonomisk nytte av investeringer i utslippsfri teknologi.

5.1 Tre scenarier og fire komponenter

I tabell 5-1 nedenfor fremstilles resultatene fra tre forskjellige scenarier for erfaring hos de ulike komponentene. Dette er resultater fra simuleringer i excel⁹. Det første scenariet ser på en situasjon der flytende vindmøller er en helt ny teknologi med fullt erfaringspotensial. Det andre scenariet tar med seg læring fra bunnfaste offshore vindmøller ut fra hvor mange MW som er produsert i Europa til nå. Det siste antar at vindmøllene tar med all læring fra all vindkraftproduksjon i verden til nå.

Scenariene har en rekke felles forutsetninger. Bakgrunnen for disse forutsetningene presenteres og diskuteres her. Installert kapasitet på verdensbasis målt i effekt er delt på normal vindmøllekapasitet på cirka 3 MW for å få et cirka anslag på hvor mange vindmøller som er produsert til nå. Vindmøllen som brukes vil være et snitt av Sway og Hywind når det gjelder kostnadsfordeling. Med de oppgitte kapitalkostnadene på 250 millioner norske kroner vil initialprisen per kWh være på rundt 1,5 krone per kWh. Demomøllene skal imidlertid ikke brukes til produksjon, og man kan forvente at demomøllens kostnad vil falle til neste stadium der vindmøllene skal produsere elektrisitet til bruk. For at initialprisen skal ligge rundt prisen på 1 krone per kWh, som Sway, Hywind og forskningsorganisasjonen Sintef opererer med (Stadaas 2008, Førland 2008 og Tande 2008), må kapitalkostnadene justeres helt ned til 175 millioner kroner i vår modell. Dette er en kostnadsreduksjon på 30 prosent fra demomøllen til neste stadium mot kommersialisering. Dette virker svært

⁹ Se vedlegg

optimistisk i forhold til en generell læringsrate på under 15 prosent. Likevel brukes en initial kapitalkostnad på 175 millioner kroner for den første 5 MW møllen. Denne forutsetningen vil uansett ikke ha noe å si for konklusjonen. Den generelle læringsraten blir satt til 0,15 som et snitt av opplysningene i vedlegget (Junginger 2005, Stadaas 2008). Til slutt er det viktig å minne på at modellen som brukes, og som ble utviklet i forrige kapittel, ikke tar innover seg global læring etter at produksjon av de flytende vindmøllene er satt i gang. Det er det samme som å anta at det ikke finnes spillover mellom industrier eller bedrifter.

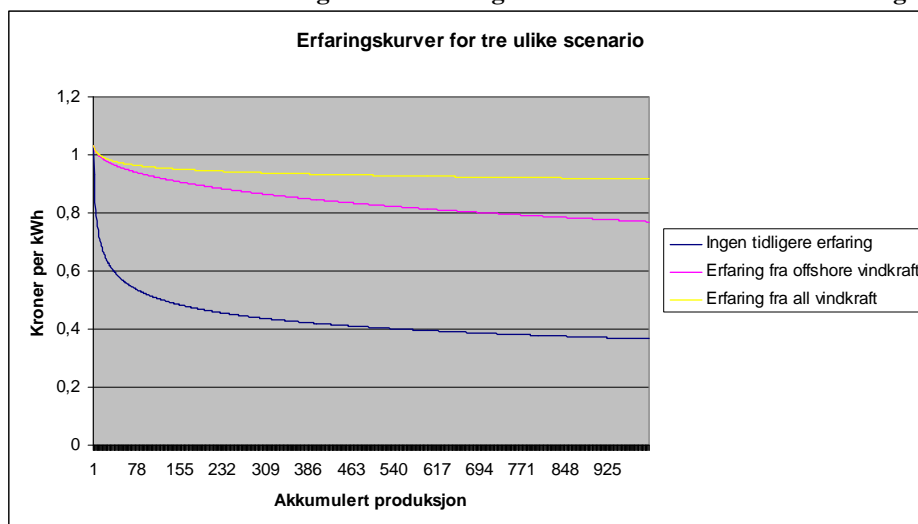
Bakgrunnen for resultatene som presenteres i tabellen og figuren nedenfor finnes i vedlegget.

Tabell 5-1 Resultat fra scenarioanalyse

	Forventet læringsfaktor	Pris per kWh etter 1000 enheter
1 Full læring, ingen erfaring	0,15	0,37
2 Erfaring fra offshore vindkraft	0,042	0,77
3 Erfaring fra all vindkraft	0,017	0,89

Tabellen viser at tidligere erfaring har mye å si for den forventede læringsfaktoren. Uten tidligere erfaring blir læringsfaktoren lik den opprinnelige generelle læringsfaktoren som er basert på observasjon av lignende teknologiers kostnadsutvikling. Jo mer erfaring det er hos enkeltkomponenter, jo lavere blir læringsfaktoren, og jo tregere vil kostnadene falle. Hva læringsfaktoren har å si for enhetsprisen ved 1000 produserte enheter, vises i den andre kolonnen.

Fra simuleringene i excel fremstilles tre hypotetiske erfaringskurver for de tre forskjellige scenariene. Den øverste kurven viser scenariet der erfaring fra all vindkraft er med når produksjonen starter. Den midterste kurven er scenariet med erfaring fra offshore vindkraft, og den nederste kurven viser utviklingen i et scenario med fullt erfaringspotensial.

Figur 5-1 Erfaringskurver med ulik historisk erfaring

Figuren viser tydelig at jo mer erfaring komponentene har fra før, jo mindre blir læringsraten, og jo slakere blir erfaringskurvens helning.

Ut i fra forutsetningene, vil et scenario der det er fullt erfaringspotensial hos alle komponenter kunne konkurrere med dagens markedspris etter omtrent 500 produserte flytende vindmøller. Det vil si at det er nødvendig å produsere over 2500 MW før teknologien er konkurransedyktig, og bedriften oppnår en positiv bunnlinje.

Det er imidlertid de to andre scenarioene som er mest realistiske siden det finnes erfaring hos en rekke komponenter når produksjon av flytende vindkraft starter opp. Ut fra forutsetningene blir derfor konklusjonen at flytende vindkraft ikke vil bli lønnsomt.

I tillegg vil scenarioet uten tidligere erfaring kreve en betydelig investering for å oppnå den mengden akkumulert produksjon som skal til før teknologien blir lønnsom. Om det er de private aktørene som bør dekke et slikt tap, eller om det er opp til staten å få et marked på plass, er temaet for den følgende diskusjonen.

5.2 Læringsinvesteringer og rammeverk for umodne teknologier

At ren luft og et stabilt klima er et typisk kollektivt gode¹⁰ er vanskelig å benekte. Å rope høyt etter produksjonsstøtte og subsidiering av lavkarbonteknologi er derfor blitt en populær aktivitet. Men subsidier til rensing inngår ikke i et optimalt reguleringsystem. Pigou-skatten, som er en enhetsskatt på eksternaliteter, har vist seg å være det mest treffsikre og effektive virkemiddelet for å regulere utslipp (Hanley et al. 1997 m.fl). En karbonskatt som et konstant påslag på enhetskostnadene er en type Pigou-skatt.

Subsidier bør derfor kun brukes som et supplement til karbonprising, i tilfeller der markedet ikke fungerer like perfekt som i økonomers grunnmodeller. Det er heller ikke gitt at utslippsfrie teknologier kun produserer positive eksternaliteter. Landfaste vindmøller gir også betydelige negative eksternaliteter i form av støy og visuell forurensning, samt skader på fugleliv og fauna. Negative eksternaliteter som ikke kommer fra karbonutslipp kan ikke glemmes selv om klima er et høyt prioritert område hos beslutningstakerne. Derfor bør vindmøller skattlegges, og ikke subsidieres, mener professor i samfunnsøkonomi ved Norges Tekniske og Naturvitenskapelige Universitet (NTNU), Anders Skonhoft (Skonhoft 2007).

Når man først har bestemt seg for å subsidiere en teknologi, er omfanget og designet av slike støtteordninger en het potet. Det finnes mange ulike varianter på "markedet" i dag. Fiskale insentiver i form av redusert skatt, stipend for demonstrasjonsprosjekter, subsidiering av kostnad til infrastruktur, grønne sertifikater og innmatningstariffer (feed-in-tariffs), er noen eksempler på ulike markedsbaserte instrumenter som er i bruk. Hvor kostnadseffektive disse virkemidlene er, vil variere.

I følge IEA (IEA 2000) blir erfaringskurver i for liten grad brukt for å analysere forskjellige typer politiske virkemidler i forbindelse med oppstart av klimavennlig teknologi. Det følgende kapittelet vil derfor bruke erfaringskurver for å analysere argumentene bak produksjonssubsidier.

¹⁰ Definisjonen på et kollektivt gode er at det er ikke-ekskluderbart og ikke-konkurrerende. Det vil si at det ikke er mulig å ekskludere folk fra å konsumere godet, og at godets kvalitet ikke forringes av at flere konsumerer det. (Se for eksempel Rosen 2003, s.55-56)

5.2.1 Erfaringskurver som analyseverktøy

Sammenlignes utslippsfri energiteknologi med teknologi som produserer energi fra fossilt brensel, er erfaringseffektene som regel mye større for utslippsfrie energiteknologier. Dette skyldes i hovedsak at energiproduksjon fra fossilt brensel generelt kommer fra mer moden teknologi hvor erfaringspotensialet allerede er fullt utnyttet.

Ved utvikling av en ny teknologi skapes ofte kunnskap både ved forskning og utvikling, og ved erfaring fra produksjon. Hvis man ikke kan ekskludere folk fra å benytte seg av kunnskapen som produseres, blir kunnskapen å anse som en positiv eksternalitet. Firmaet får ikke betalt for den verdien som hele samfunnet kan dra nytte av, og tar heller ikke denne positive verdien med i sine beslutninger. Når markedet overlates til seg selv, vil man derfor få et underskudd på innovasjon i forhold til det som er samfunnsøkonomisk optimalt. Kunnskap og informasjon er, i denne sammenhengen, et typisk kollektivt gode. Slike goder byr ofte på det man kaller et gratispassasjerproblem. Alle håper at noen andre skal betale for godet slik at det blir fritt tilgjengelig for alle. Resultatet er at godet ikke tilbys i det hele tatt.

Vindkraft kan også bidra til bedre miljøkvalitet og et mer stabilt klima.¹¹ Elektrisitet er imidlertid et lite differensierbart produkt. Det er sjelden at betalingsvilligheten til et enkeltindivid er høyere for elektrisitet fra utslippsfri teknologi. I tillegg vil det være en rekke praktiske problemer ved å gjennomføre en slik prisdifferensiering.

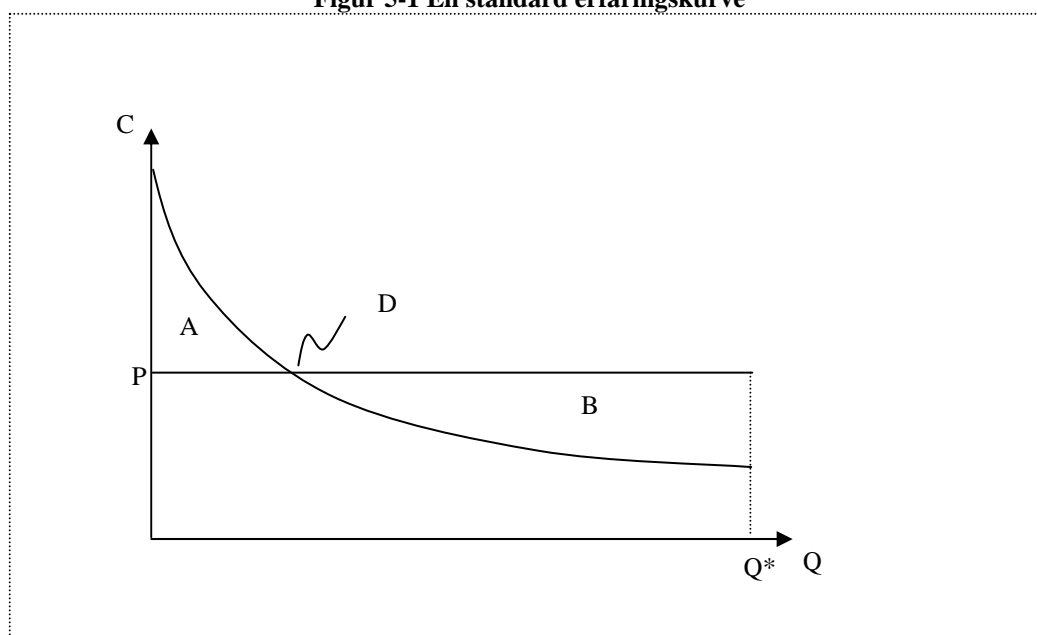
En ny og umoden teknologi må derfor ofte selges til en markedspris som er langt lavere enn kostnadene ved produksjon. Før teknologien blir konkurransedyktig går firmaet med underskudd. Tapet som må dekkes kalles ofte en læringsinvestering. Denne defineres som den akkumulerte forskjellen i kostnad hos den nye teknologien og den konkurrerende eldre teknologien fra starttidspunkt for produksjon og opp til det punktet der kostnadene er de samme (IEA 2000).

I figurene nedenfor angis læringsinvesteringen ved området A. Fremtidig utbytte angis ved området B. Q står for akkumulert produksjon, C er kostnad, D er tidspunktet da teknologien

¹¹ Det er viktig å presisere at man kun oppnår en positiv miljøeksternalitet hvis den utslippsfrie vindkraften erstatter annen kraftproduksjon som gir utlipp.

blir konkurransedyktig og den horisontale linjen angir elektrisitetsprisen, P . Q^* er en hypotetisk mengde produksjon satt for å avgrense arealet B . Q^* kan for eksempel være den mengden akkumulert produksjon man oppnår før markedet mettes. Selv om tid ikke inngår i figuren når vi ser bort i fra diskontering, vil tiden også kunne begrense arealet B ved at et utbytte tilstrekkelig langt frem i tid vil ha en verdi tilnærmet lik null. Hvis diskontering hadde blitt tatt med i modellen ville det ført til at A ble større og B ble mindre. Dagens tap ville hatt mer å si enn morgendagens nytte. En annen forenkling i figuren, er at markedsprisen er gitt og uavhengig av produksjon hos den fornybare teknologien.

Figur 5-1 En standard erfaringskurve



Det er lett å se at en nødvendig betingelse for at det skal lønne seg å investere i læringen er at området A må være mindre enn området B .

Dette er imidlertid ikke en tilstrekkelig betingelse for en lønnsomhet i investeringen til det individuelle firmaet. Når man har perfekt spillover, slik at kunnskapen som skapes ved erfaring fra produksjon er fritt tilgjengelig, vil det være fordelaktig å vente med å entre markedet til man ser at teknologien er blitt konkurransedyktig. Alle firmaene ønsker å være gratispassasjerer. Hvert firma venter på at noen andre skal ta på seg læringsinvesteringene, for så å distribuere gratis kunnskap om teknologien til resten av markedet. I et marked med fullkommen konkurranse vet man fra standard mikroteori (se f.eks Varian 2003, s.380-384) at nye bedrifter vil etablere seg i markedet når produksjonskostnadene er lavere enn markedspris og det er mulig å oppnå ekstra profitt. Nye etableringer vil komme inntil

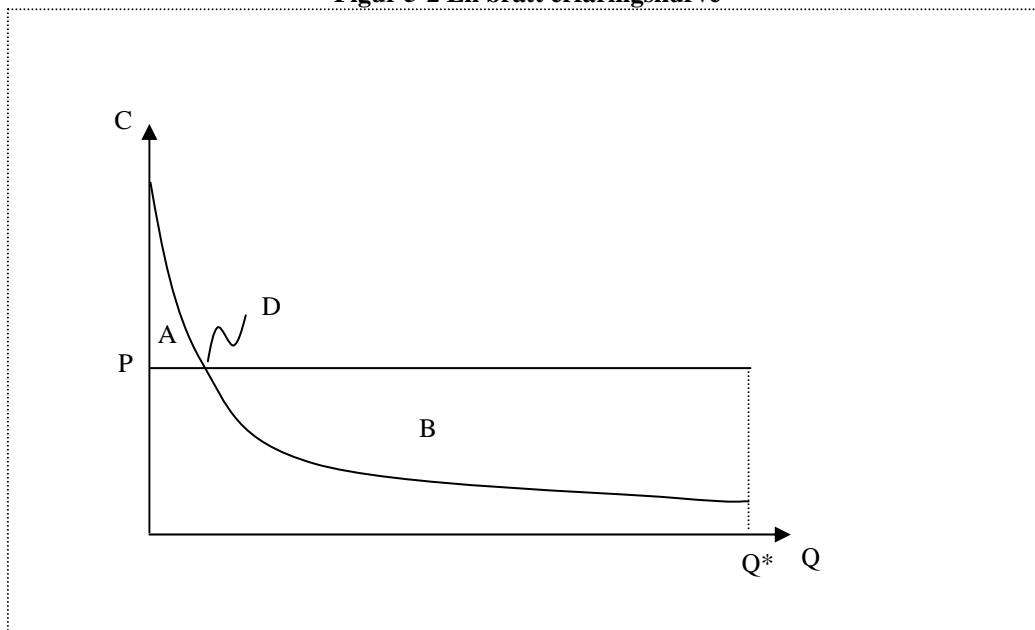
markedsprisen er lik teknologiens kostnad og hver enkelt bedrift mottar null i profitt. Når området B er lik null, vil bedriften som tar på seg læringsinvesteringene få et negativt utbytte. Da vil ingen rasjonelle aktører være villig til å betale for læringsinvesteringen. Likevel kan det være samfunnsøkonomisk optimalt å opprette et marked. I slike tilfeller kan det være hensiktsmessig å subsidiere en bedrift for å påta seg kostnadene ved å etablere et marked. (Spence 1981, Dasgupta og Stiglitz 1988)

Er det naturlig monopol i et marked vil monopolisten ta på seg læringsinvesteringen hvis han eller hun vet at profitten etter punkt D, markert med bokstaven B, er større enn læringsinvesteringen. Dette forutsetter at bedriften har evne til å se fremover i tid, og tar innover seg at dagens produksjon bidrar til økt profitt i fremtiden. En kortsiktig bedrift vil derimot ikke ta innover seg de fremtidige positive konsekvensene av læringsinvesteringen. Naturlige monopol kan oppstå på grunn av markedsbegrensninger, men også fordi det i tilfeller med mindre grad av spillover kan være samfunnsøkonomisk lønnsomt å kun ha én produserende bedrift. To bedrifter vil i tilfeller med lite kunnskapsoverføring til sammen lære langsommere enn én unik produsent. (Dasgupta og Stiglitz 1988).

Det er ikke bare når det er grunnlag for naturlig monopol at man kan se ekstreme markedskonsentrasjoner. Det er sjelden at man har perfekt spillover i et marked. Ofte er det slik at hele eller deler av kunnskapen vil forbli internt i bedriften. Da kan det lønne seg å være den første til å investere i læring fordi ingen har mulighet til å "ta igjen" det første firmaet. Bedriften som er tidligst ute med masseproduksjon og farer ned erfaringskurven på kortest mulig tid, vil ha mulighet til å oppnå monopolprofitt etter punkt D. Dette fenomenet kalles ofte "first mover advantage". En slik bedrift vil da ofte prise langt under kostnadene fordi den ser mulighetene til å bli monopolist i fremtiden. Dasgupta og Stiglitz viste at det i en slik situasjon kun er nødvendig med en marginal inngangskostnad til markedet for å stenge andre bedrifter ute (Dasgupta og Stiglitz 1988, s. 249). Det er vist at moderate læringsrater ofte lager de største barrierene for nye bedrifter som ønsker å komme inn i markedet. (Spence 1981).

Når det kommer til stykket er det helningen til erfaringskurven som er avgjørende for om en læringsinvestering er lønnsom eller ikke. Hvis læringsraten er relativt stor og erfaringskurven relativt bratt, vil det i større grad lønne seg å foreta en læringsinvestering enn om erfaringskurven er relativt slak.

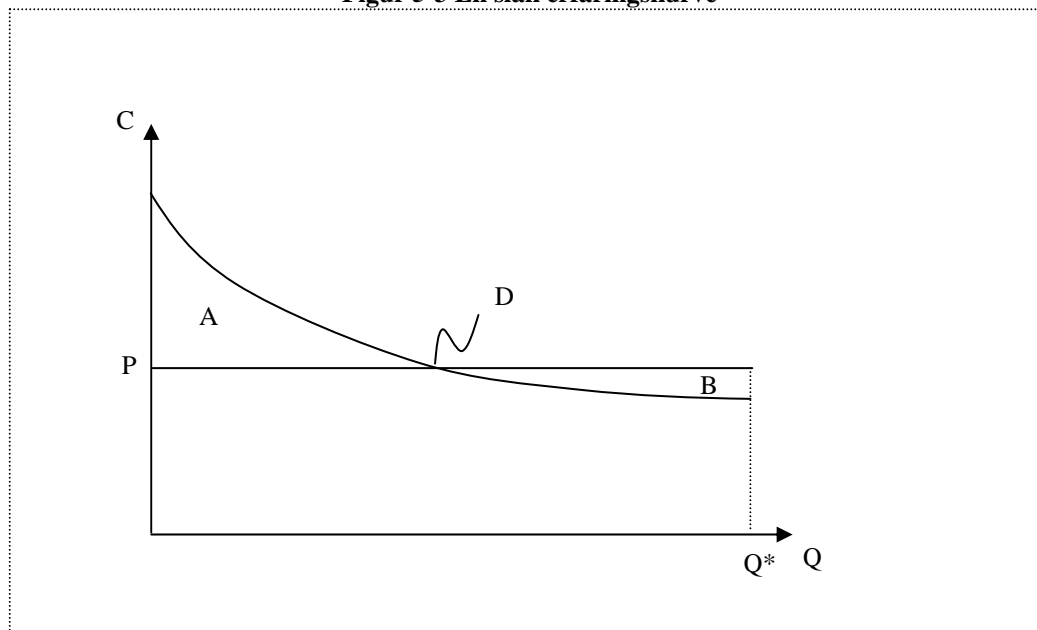
Figur 5-2 En bratt erfaringskurve



Når erfaringskurven er bratt, blir risikoen mindre for aktørene fordi man raskere når punktet D. Det positive (dog usikre) utbyttet ligger ikke så langt frem i tid, læringsinvesteringene blir mindre og det forventede utbyttet blir større. Bedrifter som tar innover seg at det de produserer i dag vil føre til kostnadsreduksjoner og overskudd i fremtiden, vil selvfølgelig uansett takke ja til ekstra penger fra staten i den første perioden. Men bedriften vil starte opp produksjon uavhengig av støttereget.

Som vi har sett i kapittel 3 og 4 vil tidligere erfaring hos enkeltkomponenter føre til at læringsraten blir mindre. Da vil veien nedover læringskurven kreve større investeringer og ta lenger tid. Fremtidig gevinst vil også bli mindre:

Figur 5-3 En slak erfaringskurve



Både Sway og Hywind sier at de er avhengig av mer statlig støtte for å kunne påta seg de store læringsinvesteringene som er nødvendig for å skape et marked for flytende vindkraft. Sway er et relativt lite selskap med rundt 15 ansatte. Med dagens svake finansielle muskler mener Sway at de er avhengige av at støtten til den første demomøllen øker fra 30 til 50 prosent.

Statoil Hydro vil som landets største bedrift, både når det gjelder omsetning og resultat, ha mindre problemer med kapitaltilgang. Før Statoil og Hydro slo sammen sin petroleumsvirksomhet, og Hydro fisjonerte ut nærmere 70 prosent av sin aksjekapital, lå Statoil og Hydro sine driftsinntekter på henholdsvis 431 og 195 milliarder kroner (NHD 2008 s.62-63). Til sammenligning med den norske stat sine beregnede inntekter for 2008, på 1037 milliarder kroner, har selskapet en stor tyngde. Det gjør at de har mulighet til å ta risikoen ved investering fordi de kan spre risikoen på ulike områder i selskapet. Med så stor tilgang på kapital kan de også tillate seg en lenger horisont på investeringene.

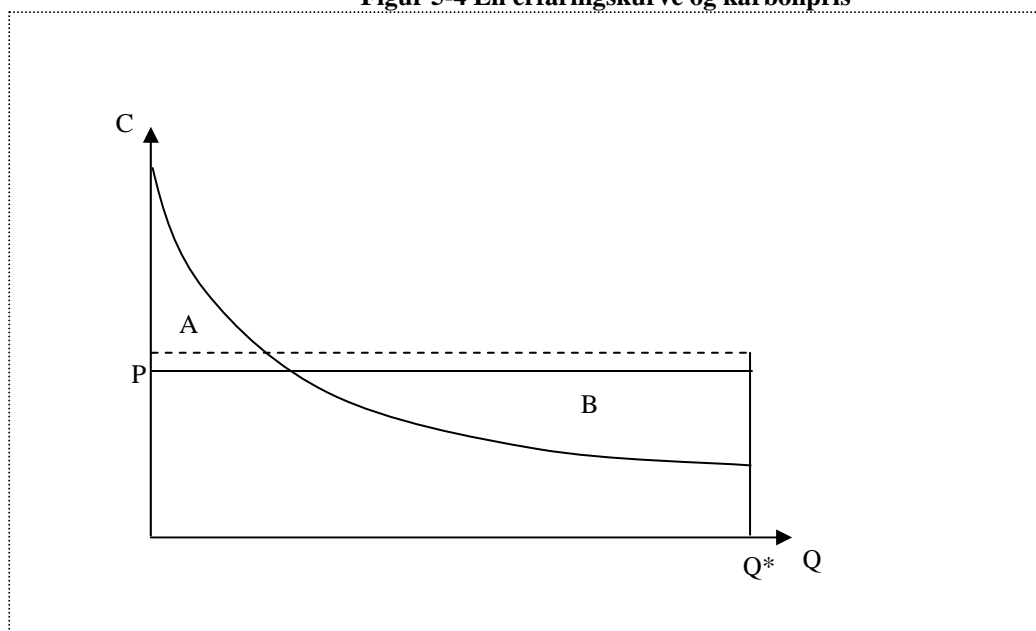
Statoil Hydro og Hywind er ikke redd for konkurranse i markedet. På det tidspunktet teknologien eventuelt blir kommersialiserbar mener de at de vil ha en betydelig "first mover

advantage”. Dette vil hindre tilgang av nye aktører på grunn av barrierer som er beskrevet tidligere i dette kapittelet (Stadaas 2008).

Slik figur 5-3 viser, vil en tilstrekkelig slak erfaringskurve bety at det ikke lønner seg å investere i teknologien, verken for private eller offentlige aktører. Utbyttet er for lite i forhold til investeringen, og ligger så langt frem i tid at utbyttet neddiskonteres mot null. Hvis ingen av aktørene er villige til å betale hele eller ganske store deler av læringsinvesteringen, kan det være et signal om at læringskurven er for slak til at teknologien kan anses som kostnadseffektiv på sikt.

Både Sway og Hywind nevner at usikkerhet rundt fremtidens karbonpris, og om den underliggende elektrisitetsprisen, gjør det vanskeligere å beregne fremtidige kostnader. Men selv om en slik usikkerhet kan redusere investeringsinsentivene, viser figuren nedenfor at karbonprisen også er med på å redusere risikoen ved at læringsinvesteringene blir mindre og det fremtidige utbyttet blir større. Karbonprisen ligger her som et påslag på markedsprisen. Den stiplede linjen er elektrisitetsprisen inklusive prisen på karbonutslipp.

Figur 5-4 En erfaringskurve og karbonpris



5.2.2 Optimal subsidie

Selv om produksjon ikke bør subsidieres ukritisk, finnes det tilfeller med stor spillover av informasjon og sterk konkurranse. Da kan ulike typer produksjonsstøtte være hensiktsmessig

for å opprette et marked (Dasgupta og Stiglitz 1988). Sternrapporten foreslår for eksempel at denne typen støtte til lavkarbonteknologier bør øke to til fem ganger internasjonalt fra nåværende nivå på 34 milliarder dollar (Stern 2006).

Tysklands vindmølleindustri i perioden 1990 til 1998 trekkes frem som et eksempel på vellykket bruk av produksjonsstøtte (IEA 2000). I tidsrommet økte kapasiteten i Tyskland fra 60 til 2900 MW samtidig som kostnadene falt fra 2500 til 1700 DM per kW. Veksten ble støttet av de offentlige programmene "100 MW wind programme" innført i 1989 og av "The Electricity Feed Law" som ble innført i 1991. Fordelen til disse programmene var at subsidiene avtok etter hvert, og dermed fulgte erfaringskurven. I 1998 var andelen MW som ble produsert uten å få støtte fra programmet langt høyere enn de få produsentene som fortsatt fikk støtte. Dette viser hvordan støtten til de bedriftene som var med i støtteprogrammene dannet utgangspunkt for et marked.

Disse subsidiene lignet på en optimal subsidie, siden støtten avtok etter hvert som kostnadene sank. Ved å se på erfaringskurven i figurene i dette kapitlet er det tydelig at forskjellen mellom markedspris og teknologiens enhetskostnader synker etter hvert som produksjonen øker. Ved å bruke en slik tilnærming unngikk tyske myndigheter unødvendig store kostnader. I teorien vil det være lett å finne en optimal subsidie for læringsinvesteringen, forutsatt full spillover og perfekt konkurranse. Et slikt subsidie vil følge læringskurven slik at støtten i grove trekk blir mindre ettersom akkumulert produksjon øker og kostnadene synker (IEA 2000). I spesialtilfeller med synkende markedspris eller karbonpris bør imidlertid en optimal subsidie stå fast eller øke i en periode. Informasjonstilgang og kostnadskrevende administrasjon er dessverre et stort problem ved gjennomføringen av et program med optimale subsidier. I tillegg etterlyser blant annet IEA (IEA 2000) en utvikling av erfaringskurver, både når det gjelder usikkerhet og relevante data, før de i utstrekning kan brukes som et verktøy for analyse av politiske virkemidler.

6 Konklusjon

Vil flytende vindkraft kunne konkurrere med konvensjonell kraftproduksjon i fremtiden?

Dette er oppgavens hovedspørsmål. Med den oppmerksomheten flytende vindkraft har fått i mediene det siste året er det mange som vil være interessert i et klart og bombastisk svar. Og ut i fra forutsetningene gir oppgaven et rimelig entydig svar på spørsmålet. Dette svaret er basert på at erfaring med produksjon er det eneste som gir kostnadsreduksjon, og at de flytende vindmøllene ikke kan dra nytte av annen vindkraftproduksjon etter produksjonsstart.

Basert på en modell som utvikles i kapittel 3, presenterer kapittel 4 tre scenarier for kostnadsutvikling hos flytende vindmøller. I de to mest realistiske scenariene anses erfaringspotensialet hos flytende vindkraft å være ”brukt opp” hos enkelte komponenter. Sammenlignet med en teknologi uten erfaring med produksjon vil ikke kostnadene synke like raskt. Resultatene fra disse to scenariene viser at flytende vindkraft vil være for kostnadskreven å satse på. Selv etter at 1000 flytende vindmøller på 5 MW er produsert, avviker kostnadene fortsatt kraftig fra dagens markedspris.

Det mest urealistiske scenariet ligner den utviklingen som de to aktørene bak flytende vindkraftteknologi baserer seg på. Dette scenariet bruker erfaringskurvene slik det er mest vanlig å bruke dem i dag. Resultatene avviker sterkt fra de to andre scenariene. Den nye modellen belyser dermed en viktig begrensning ved tradisjonell bruk av erfaringskurver. Slik gir oppgaven også et svar på sidespørsmålet; Hvordan kan erfaringskurver brukes til å fremskrive kostnader, og til å analysere politiske virkemidler for teknologiutvikling?

Den nye modellen dekomponerer den aktuelle teknologien i flere komponenter. Slik kan lavere erfaringspotensial enn antatt avdekkes hos umodne teknologier. Potensialet for videre kostnadsfall reduseres betydelig fordi vindkraft generelt allerede har sunket betraktelig i pris. Flytende vindkraft er relativt lik den modne teknologien bak landfast vindkraft, og kan derfor ikke anses som en helt umoden teknologi.

Den mest optimistiske og urealistiske kostnadsutviklingen i scenarioanalysen viser at flytende vindkraft etter hvert blir konkurransedyktig. Dette scenariet vil uansett kreve lang tid og enorme investeringer for å opprette et marked. Disse investeringene ønsker Sway og Hywind å få dekket gjennom støtte fra den norske stat.

Selv om det viser seg at teknologien blir konkurransedyktig innen rimelig tid, er det ikke åpenbart at staten skal subsidiere denne investeringen. I følge Sway og Hywind, vil mye av erfaringen ved produksjon forbli internt i bedriften. Siden bedriftene har mulighet til å ekskludere andre fra å benytte seg av erfaringen de produserer, forsvinner et argument for å støtte teknologien. Når den private beslutningstakeren tar innover seg all nytten ved produksjon, vil markedet i utgangspunktet selv allokere ressurser til den teknologien som er mest effektiv.

I et samfunn med begrensede ressurser kan ikke alle de utallige ideene for utvikling av ny utslippsfri energiteknologi testes ut i full skala. Entusiasmen er stor når nye og spennende teknologier lanseres, men disse kan være basert på bokstavelig talt høytflygende ideer. I USA og Canada er for eksempel oppmerksomheten stor rundt flygende vindmøller (Dagens Næringsliv 2008). Det finnes mange måter å redusere klimautslipp på. Kanskje bør statens penger heller brukes på utbygning av en jernbane med dobbeltspor, eller gå til atomkraft. Derfor trengs metoder og verktøy som kan skille ut dårlige ideer før ressurser ukritisk settes av til utvikling av teknologi som er og blir for dyr. Erfaringskurver kan være et slikt verktøy, men for at disse skal kunne brukes til å evaluere politikkverktøy må en forbedring til. Både i litteraturen og blant aktørene i oppgavens case, er det enighet om at erfaringskurvene må utvikles både når det gjelder datagrunnlag og utforming. Å dekomponere erfaringskurvene i ulike komponenter kan være et skritt i riktig retning.

7 Kilder

Arrow, Kenneth J. (1962): "The Economic Implications of Learning by Doing", *The Review of Economic Studies*, Vol.29, No.3: 155-173

Bratland, S. (2008): telefonsamtale 10.03.2008 med eiendomsansvarlig i Hywind, Sjur Bratland

Bahn, O. og Kypreos, S. (2003): "Incorporating different endogenous learning formulations in MERGE", *International Journal of Global Energy Issues*, Vol.19, No.4: 333-358

Boston Consulting Group (1968): "Perspectives on Experience". Boston Consulting Group Inc.

Clarke, L., Weyant, J. og Edmonds, J. (2006): "On the sources of technological change: Assessing the evidence", *Energy Economics*, Vol.28: 579-595

Cohen, L. og Noll, R.G. (1991): "The Technology Pork Barrel", Washington D.C.: The Brookings Institution

Dagens Næringsliv (2008): "Vindmølleparadiset", lørdag 12.04.2008, s.50-51

Dagens Næringsliv (2008b): "StatoilHydro vil ha tidoblet støtte", mandag 28.04.2008, s.10

Dasgupta, P. og Stiglitz, J. (1988): "Learning-by-Doing, Market Structure and Industrial and Trade Policies", *Oxford Economic Papers – New Series*, Vol 40, No.2: 246-268

EWEA (2008): "Wind energy leads EU power installations in 2007, but national growth is inconsistent",
http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/ mailing/PR_040208_2007stats.pdf, lastet ned 31.03.2008

Førland, M. (2008): telefonsamtale 04.04.2008 med finansdirektør i Sway, Michael Førland

Gielen, D., Mattson, N., Unander F. og Clas-Otto Wene (2003): "Technology Learning in the IEA ETP project – A discussion paper", http://www.iset.uni-kassel.de/extool/Gielen-Learning_IEA_ETP_project.pdf, lastet ned 17.03.2008

Greaker, M. og Sagen, E.L. (2008): "Explaining experience curves for new energy technologies: A case study of liquefied natural gas", *Kommer i Energy Economics*

Haavelmo T. (1954): "A study in the theory of economic evolution", Amsterdam: North-Holland Publishing Company

Hall, G. og Howell, S. (1985): "The experience curve from the economist's perspective", *Strategic Management Journal*, 6: 197-212

Hanley, N., Shogren, J.F. og White, B. (1997): "Environmental Economics in Theory and Practice", New York: Oxford University Press

IEA (2000): "Experience Curves for Energy Technology Policy", IEA/OECD: Paris.

Isoard, S. og Soria, A. (2001): "Technical change dynamics: evidence from the emerging renewable energy technologies", *Energy Economics*, Vol 23: 619-636

Johansen L. (1972): "Production Functions", Amsterdam: North-Holland Publishing Company

Joskow, P.L. og Rose, N.L. (1985): "The effects of technological change, experience and environmental regulation on the construction cost of coal-burning generating units", *Rand Journal of Economics*, Vol. 16, No. 1,

Junginger, Hans Martin (2005): "Learning in Renewable Energy Technology Development", Thesis: Utrecht University

Neij, L. (1997): "Use of experience curves to analyse the prospects for diffusion and adoption of renewable energy technology", *Energy Policy*, Vol.23, No.13: 1099-1107

NHD (2008): "Statens eierberetning 2006",
http://www.eierberetningen.no/gfx/2006/eierberetningen_2006.pdf, lastet ned 10.04.2008

OED (2008): "Kunstnerisk overrekkelse av Energi21-strategien",
<http://www.regjeringen.no/nb/dep/oed/aktuelt/nyheter/2008/Kunstnerisk-overrekkelse-av-Energi21-str.html?id=499240>, lastet ned 05.02.2008

Rosen, H. S. (2003): "Public Finance, 7th edition", New York: McGrawHill

Rosenberg, Nathan (1982): "Inside the Black Box: Technology and Economics", Cambridge: Cambridge University Press

Skonhoft, A. (2007): "Innfør skatt på vindkraftutbygging",
<http://www.adressa.no/incoming/article990967.ece>, lastet ned 25.04.2008

Solow, R. (1956): "A Contribution to the Theory of Economic Growth," *Quarterly Journal of Economics*, Februar 1956

Spence, A.M. (1981): "The Learning Curve and Competition", *The Bell Journal of Economics*, Vol. 12, No.1: 49- 70

Stadaas, J. (2008): møte på Vækerø 03.04.2008 med overingeniør i Statoil Hydro, Jan-Fredrik Stadaas

Stern, N. H. (2007): "The Stern Review Report on the Economics of Climate Change", Cambridge: Cambridge University Press

Stormyr, E. (2008): telefonsamtale 29.03.2008 med Erik Stormyr ved Aker Verdal

Sweco Grøner 2007: "Potensialstudie av havenergi i Norge", Lastet ned 27.03.2008 <http://www.enova.no/dialog.aspx?action=file&fileid=1150>

Sydsæter, K. (2003): "Matematisk analyse, bind 1", 7. utgave, 2. opplag, Oslo: Gyldendal Norsk Forlag

Tande, J. O. (2008a): telefonsamtale 17.03.2008 med John Olav Tande, seniorforsker SINTEF energiforskning

Tande, J. O. (2008b): mail datert 28.03.2008 og 29.03.2008 fra John Olav Tande, seniorforsker SINTEF energiforskning

Teknisk Ukeblad (2008): "Trenger ikke norsk vindsatsing på land", <http://www.tu.no/energi/article121249.ece>, lastet ned 1. april 2008

Varian, H.R. (2003): "Intermediate Microeconomics, a modern approach", Sixth Edition, New York: Norton & Company

Wahlquist, H. H. (2007): "Bottom-up modeller og subsidiering - nyttige for økonomisk planlegging eller morsomme leketøy?", <http://wo.uio.no/as/WebObjects/theses.woa/wa/these?WORKID=65710>, lastet ned 15.04.2008

Wright, T.P. (1936): "Factors affecting the cost of airplanes", Journal of Aeronautical Sciences, Vol. 3: 122

WWEA (2008): "Wind turbines generate more than 1 % of the global electricity", <http://www.wwindea.org/home/index.php>, lastet ned 05.04.2008

8 Vedlegg

8.1 Simuleringer i excel