

# Drivmidler baseret på vedvarende energi

Kaj Jørgensen, Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet  
Lars Henrik Nielsen, Systemanalyseafdelingen, Forskningscenter Risø

## Abstract

Konflikten mellem klimamålene og væksten i transporten medfører at stort behov for effektivisering af transportsektoren. I praksis sker der imidlertid meget få fremskridt trods mange forventninger om realisering af de store potentialer.

Alternative drivmidler kan være et middel til at mindske denne konflikt. Forudsætningen for at de kan blive et effektivt middel til CO<sub>2</sub>-reduktion er imidlertid at de er baseret på vedvarende energi, eller som et minimum at de udnyttes meget effektivt. For de VE-baserede drivmidler er det imidlertid også vigtigt at disse udnyttes effektivt, ikke mindst fordi denne effektivitet bestemmer ressourceforbruget til drivmiddel-fremstillingen (især arealforbruget).

I dette papir belyses perspektiverne ved at benytte el og brint som energibærere for vedvarende energi til anvendelse i transportsektoren. Der sammenlignes med forskellige andre muligheder for VE-baserede drivmidler (især biobrændstoffer). Endvidere analyseres de energi- og miljømæssige konsekvenser af el- og brintdrift, såfremt fremstillingen af disse baseres på fossile brændsler via det offentlige elnet. Analysen sker for biler der i udgangspunktet er ens, bortset fra de forskellige drivsystemer.

Papiret er begrænset til at se på tekniske forbedringer af de enkelte transportmidler, mens det ikke dækker mulighederne for mere effektive transportsystemer (f.eks. skift til kollektiv trafik, bedre udnyttelse af transportmidler og styring af trafikstrømme). De tekniske forbedringer kan - i grove træk - overføres mellem de enkelte typer af transportmidler, og derfor vil mere effektive transportsystemer yderligere forøge potentialerne for at reducere energiforbrug og emissioner.

## Indledning

Ofte får de tekniske forbedringer en rolle som "feberredningen" i forsøgene på at skabe bæredygtig udvikling - det vil sige det middel der skal redde bæredygtigheden i land på trods af transportudviklingens katastrofekurs. Nogle argumenterer tilmed for at vi kan leve et sorgløst liv og alligevel nå bæredygtighedsmålene - f.eks. om CO<sub>2</sub>-reduktion - fordi der lige efter årtusindskiftet vil vælte hypereffektive biler frem der kører direkte på solens energi. Som der vil blive argumenteret for i det følgende er dette en særdeles urealistisk forventning.

Ikke desto mindre kan de tekniske forbedringer af køretøjer og transportsystemer spille en vigtig rolle med hensyn til at fremme en bæredygtig udvikling. Ikke som løsningen på alle problemer men som et vigtigt hjælpemiddel der kan forøge manøremulighederne i transportplanlægningen.

Flere steder i det følgende bliver termen "køretøj" brugt, hvilket afspejler at der tages udgangspunkt i effektivisering af biler og busser. Men mange af overvejelserne kan dog også overføres på andre transportmidler som tog, skibe og fly.

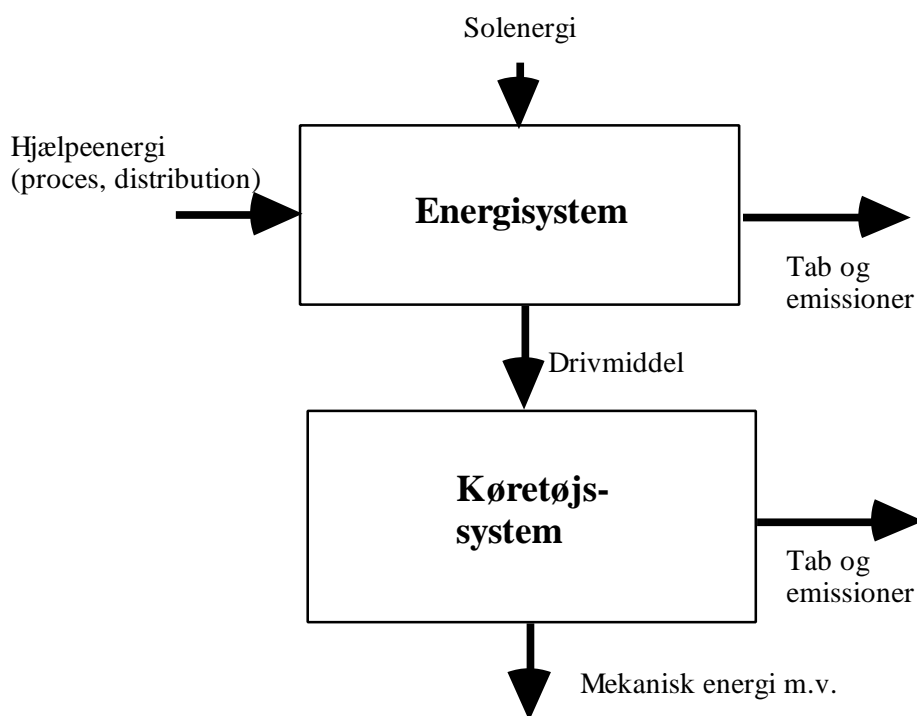
## Energikæde-begrebet

Energikæden beskriver hele omsætningskæden fra primær energikilde - hvad enten denne er fossil eller en vedvarende energikilde - til den mekaniske energi der driver køretøjet. Konceptet benyttes bl.a. i Ecotraffic (1992), Bang & Holden (1991) og DeLuchi m.fl. (1989). Det skal understreges at energikæden knytter sig til den energi der benyttes til drift af køretøjet, mens der ses bort fra egentlige livscyklusbetragtninger af de benyttede teknologier (d.v.s. fra energi- og miljøeffekter i forbindelse med fremstilling og bortskaffelse af køretøjer, energiforsyningsteknologi m.v.).

Energikædens effektivitet bestemmer arealforbruget. Som reference for effektiviteten benyttes energiindholdet i solindstrålingen, der er ca. 1000 kWh/m<sup>2</sup> pr. år for en vandret flade. For visse typer af vedvarende energi - specielt solceller og biomasse - er det direkte den energi der indstråles på den konkrete flade som udnyttes, mens det for andre typer - specielt vindkraft - ikke direkte er den indstrålede energi der udnyttes.

Energikæden falder i to hoveddele, jf. fig. 1:

- Energisystemet, der dækker konverteringen af primærenergien til drivmiddel og distributionen af denne til køretøjet.
- Køretøjssystemet, der omdanner drivmidlet til mekanisk energi.



Figur 1. Skematisk illustration af energikæden for drivmidler baseret på vedvarende energi.

Energisystemet omfatter bl.a. konvertering af solenergien til drivmiddel, hvad enten denne konvertering sker i ét trin - nemlig i forbindelse med el der anvendes direkte i elbiler - eller i to trin, f.eks. via biomasse til biobrændstof eller via el til brint.

Endvidere omfatter energisystemet distributionen af drivmidlet til de enkelte køretøjer. Udover det direkte solenergi-input vil der ofte være et hjælpeenergiforbrug til fremstilling og distribution af drivmidlet. Dette kan være fossil energi og dermed forbundet med CO<sub>2</sub>-emission. Derfor er CO<sub>2</sub>-reduktionen ikke nødvendigvis 100% selv for drivmidler der er 100% VE-baserede.

Køretøjssystemet, d.v.s. energiomsætningen ombord i køretøjet, kan også deles op i en forbrugsside, der bestemmer hvor meget drivsystemet belastes, og en forsyningsside (d.v.s. drivsystemet), der bestemmer mængden af drivmiddel for at dække denne belastning. Forbrugssiden bestemmes af faktorer som køretøjets vægt, størrelse, aerodynamisk udformning, rullemodstand m.v. Der er også behov for forskellige former for hjælpeenergi ombord i køretøjet (f.eks. til pumpning, lys, opvarmning m.v.). Drivsystemet omfatter i første række følgende komponenter: traktionsmotor, transmission, energilager og elgenerator.

De VE-baserede drivmidler kan inddeles i 3 hovedkategorier, baseret på henholdsvis biobrændstoffer, eldrift (og varianter heraf) samt brintdrift. Denne inddeling omfatter ikke alle varianter, men dækker langt de vigtigste muligheder.

De tre kategorier gennemgås nærmere i de efterfølgende afsnit. Beskrivelsen bygger, hvor intet andet er nævnt, på Jørgensen & Nielsen (1997) og Jørgensen (1997).

## **Energikæder baseret på biobrændstoffer**

Denne kategori omfatter først og fremmest de flydende biobrændsler - især etanol, metanol og rapsolie - men også biogas (metan). Fælles for dem er at de er baseret på biomasse. Det kan være affalds- eller overskudsprodukter eller energiafgrøder der dyrkes specifikt til energiformål. I det følgende fokuseres på flydende biobrændsler baseret på energiafgrøder, hvilket er af afgørende betydning for konklusionerne. For affaldsprodukter som der ikke er andre anvendelser for er problemstillingen anderledes.

Omdannelsen af solenergi til biomasse (fotosyntesen) sker ved en meget lav effektivitet (omkring 0,3-0,5%), og derfor har disse energikæder generelt en meget lav effektivitet.

Konverteringen af biomasse til biobrændsler - d.v.s. til etanol, metanol eller rapsolie - sker typisk ved en effektivitet på 50-80%. En del af dette energiindhold optræder dog i form af biprodukter, og de nævnte virkningsgrader forudsætter at disse kan udnyttes.

I køretøjet udnyttes biobrændstofferne med en samlet virkningsgrad i størrelsesordenen 15-20%. Dette gælder for forbrændingsmotordrevne køretøjer. Metanol og etanol kan bruges i brændselscelledrevne køretøjer hvorved køretøjseffektiviteten bliver i størrelsesordenen 35-40%.

Samlet bliver disse energikæders effektivitet ca. 0,05-0,10% ved anvendelse i forbrændingsmotordrevne køretøjer og 0,1-0,2% for brændselscelle-køretøjer.

Selvom biobrændsler ofte betegnes som CO<sub>2</sub>-neutrale, er der i praksis et forbrug af fossil energi - og dermed CO<sub>2</sub>-emissioner - til fremstilling og distribution af disse drivmidler. Det varierer mellem drivmidlerne og afhænger desuden af hvorledes dyrkning, produktionsproces og distribution organiseres. Hvis der gøres en målrettet indsats for at minimere forbruget af fossil energi, svarer CO<sub>2</sub>-emissionen fra biobrændslernes energikæde til op til ca. 25-30% af den CO<sub>2</sub> der fortrænges. For visse

biobrændsel-typer kan den blive meget lav, i visse tilfælde tæt på nul. Men der er også eksempler på biobrændsler med større end CO<sub>2</sub>-udslippet fra benzin/diesel.

Et middel til at reducere CO<sub>2</sub>-udslippet er at bruge biomasse som procesenergi, men herved forringes energiudbyttet pr. arealenhed. Det er som regel dyrkningen af energiafgrøder der er den mest problematiske del, specielt for afgrøder hvor det er svært at undvære kunstgødning og pesticider.

## **Energikæder baseret på eldrift**

VE-drivmidler baseret på eldrift tager udgangspunkt i el produceret ved hjælp af vedvarende energikilder, f.eks. vindkraft, solceller, bølgeenergi og vandkraft. Også el produceret i biomasse-kraftvarmeanlæg er en mulighed.

Solceller omsætter solens energi med en virkningsgrad på ca. 10-12%, og betydeligt højere effektiviteter anses at blive opnåelige inden for de kommende år. Udbyttet pr. arealenhed for vindkraft afhænger af typen af anlæg og størrelsen af vindmøllerne, samt - ikke mindst - hvor meget areal der tælles med. For vindmølleparker kan der regnes med et udbytte på ca. 20-30 kWh/m<sup>2</sup> pr. år, svarende til ca. 2-3% af den indstrålede energi på arealet, og ca. 50% mere for havbaserede møller. For enkeltstående møller er det svært at bestemme præcist hvor stort areal der skal medregnes.

Lidt af denne el tabes ved distributionen: Baseret på det danske elsystems gennemsnit drejer det sig om ca. 7-8%, men hvis der er tale om lokalt produceret el kan der være tale om et mindre tal.

I dagens elbiler omsættes den tilførte el med en effektivitet på ca. 50%, når regenerering af bremseenergi er medregnet. I de mere avancerede elbiler der kan forventes på markedet i løbet af 10-15 år bliver køretøjseffektiviteten måske 70-80% eller endnu højere.

Den samlede effektivitet fra solenergi til drivende hjul er på den baggrund ca. 5% for el fra solceller og 1-2% for el fra vindmølleparker. Sammenlignet med biobrændslerne er energikæden "solcelle-el til eldrift" altså 50-100 gange så effektiv, mens "vindkraft-el til eldrift" er mellem 10 og 40 gange så effektiv.

Med disse energikæder er CO<sub>2</sub>-reduktionen 100% (hvis der ses bort fra livscyklusbetragtninger).

Hybriddrift, der er en variant af eldrift, vil ikke blive berørt i denne sammenhæng.

## **Energikæder baseret på brint**

Ved brintdrift baseret på vedvarende energi fremstilles brinten som regel ved elektrolyse på basis af el fra vindkraft, solcelleanlæg eller lignende. En anden mulighed er brintproduktion fra biomasse, men på grund af biomassens arealforbrug giver dette en meget ineffektiv energikæde, og derfor ses der bort fra den i det følgende. Brintproduktion ved forgasning af biomasse-affaldsprodukter kan dog være en god ide.

Hvis man ikke sigter mod at fremstille brinten ud fra vedvarende energi, er der også andre fremstillingsmåder, ikke mindst reformering af naturgas.

Brinten kan enten anvendes i forbrændingsmotorer eller i brændselsceller.

På samme måde som for eldrift er lagringen af energien ombord i køretøjet et centralt problem for brintdrift. Lagring på flydende form (LH2) giver den største rækkevidde, men også en meget dårlig systemeffektivitet på grund af energiforbruget til at bringe brinten på flydende form (d.v.s. fordråbningen) samt relativt store tab i forbindelse med håndteringen af brinten). Lagring på gasform ved højt tryk (tryksat brint, forkortet CH2) eller i metalhydrider (MeH) giver bedre effektiviteter, men også mere begrænset rækkevidde (Jørgensen 1996).

Produktionen er el ved hjælp af vedvarende energi svarer til det der er beskrevet i omtalen af eldrift-energikæden. Fremstillingen af brint kan typisk ske ved en effektivitet på ca. 80-90% eller højere. I dag drives mange anlæg ved væsentlig lavere effektiviteter som følge af at de ofte bygger på overskuds-el i rigelige mængder - typisk i forbindelse med vandkraft - hvorfor der ikke er incitament til at spare på strømmen.

Der er også tab i forbindelse med distribution og håndteringen af brinten. For CH2 og metalhydrider kan disse tab anslås til 10-20%, forudsat at der gøres en indsats for at minimere tabene (Ogden 1997). For flydende brint er tabene noget større fordi det er sværere at håndtere brinten på denne form. Tabene kan derfor sættes til 25-30% i bedste fald i dette tilfælde.

Hvis brinten skal komprimeres, kræver dette typisk et elforbrug i størrelsesordenen 7-10%, mens fordråbningen af brinten kræver et elforbrug på mindst 10-11 kWh pr. kg brint, svarende til ca. 1/3 af brintens energiindhold (Pescka 1992). Det store tab, der ikke kan genvindes, hænger sammen med at brinten skal nedkøles til -253°C.

Køretøjeffektiviteten er i størrelsesordenen 15-20% i forbrændingsmotor-køretøjer og 40-45% i brændselscelle-køretøjer. I førstnævnte kan der opnås en vis forbedring af motorens energiomsætning sammenlignet med benzinmotorer - men mindre end den usikkerhed der opereres med i beregningen. Ved skift fra dieseldrift til brintdrift i forbrændingsmotorer forringes effektiviteten derimod fordi det er nødvendigt at skifte til gnisttændingsmotorer.

Med el fra solceller bliver den samlede effektivitet for den forbrændingsmotor-drevne bil ca. 1,0-1,5% baseret på CH2 eller MeH og ca. 0,5-0,7% baseret på LH2. For el fra vindmølleparker bliver energikæde-effektiviteten ca. 0,2-0,6% for CH2/MeH og 0,1-0,3% for LH2.

Med el fra solceller får den brændselscelle-baserede bil en samlet effektivitet på ca. 2,5-4% baseret på CH2 eller MeH, og 1-2% for LH2-lagring. Baseret på vindmølleparker bliver den samlede effektivitet 0,5-1,8% for CH2/MeH og 0,2-0,8% for LH2.

Det er altså værdier der ligger mellem de værdier der blev beregnet for henholdsvis biobrændsler og eldrift - og tættest på sidstnævnte. Med brændselsceller kan brintdrift komme relativt tæt på dagens eldrift hvad angår effektivitet. Det ses at brintdrift baseret på lagring på flydende form er væsentlig dårligere.

## **Arealforbrug**

Energikædernes effektivitet bestemmer det nødvendige arealforbrug til konverteringen af solenergien til et givet forbrug. I tabel 2 er dette vist ved de forskellige energikæders brutto-arealforbrug til at dække to transportenergiforbrug, nemlig dels en gennemsnitlig personbils årlige forbrug, dels det årlige danske transportenergiforbrug. At der er tale om brutto-arealforbrug, betyder at der ikke er

taget hensyn til om de beregnede arealer kan integreres med andre anvendelser. Beregningen illustrerer således problemets omfang, men ikke nødvendigvis det præcise forbrug af arealer. Ligeledes skal det understreges at der er tale om hypotetiske beregninger der ikke tager hensyn til om der er - eller vil blive - teknologier til at dække de pågældende behov.

	areal til ref. personbil m <sup>2</sup>	areal til transportenergi km <sup>2</sup>
Eldrift, solcelle	15-30	60-140
Eldrift, vindkraft	80-200	350-900
Brintdrift, forbrændingsmotor, solcelle	60-250	250-1000
Brintdrift, brændselscelle, solcelle	30-100	140-400
Brintdrift, forbrændingsmotor, vindkraft	350-1500	1400-6300
Brintdrift, brændselscelle, vindkraft	190-750	800-3000
Flydende biobrændsel, forbrændingsmotor	1900-3800	7800-16000
Flydende biobrændsel, brændselscelle	1000-1900	3900-7800

*Table 1. De to søjler viser det beregnede nødvendige areal for at dække hensholdsvis det årlige brændstofforbrug i en mellemklasse-personbil og det samlede danske transportenergiforbrug.*

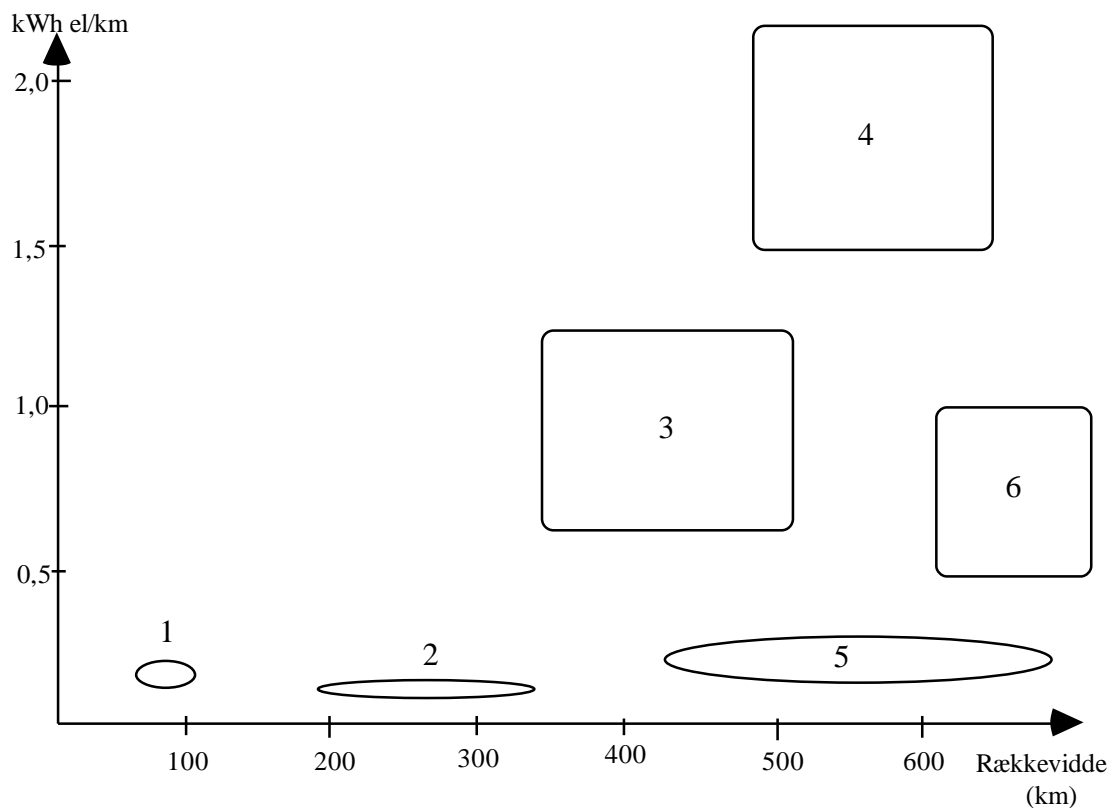
Det ses at arealforbruget til biobrændsler er op til 100 gange så stort som for den mest effektive energikæde (eldrift baseret på solceller). Samtidig er arealkravet også af en størrelsesorden der kan gøre det til et problem i absolutte termer: Flydende biobrændsler i forbrændingsmotorer vil kræve mellem 1/5 og 1/3 af det samlede danske landareal (43.000 km<sup>2</sup>) for at dække det samlede transportenergiforbrug i Danmark. Transportsektoren tegner sig for godt en femtedel af det samlede energiforbrug i Danmark.

## Sammenligning af el- og brintdrift

Da beregningerne viser at eldrift er den mest effektive energikæde, og at den formentlig vil fortsætte med at være dette også i fremtiden, kunne man argumentere for at satse på denne mulighed og kun den. Dette er imidlertid problematisk, dels fordi det er en risikobetonet strategi at satse alt på én hest, dels fordi eldrift har en vigtig begrænsning: nemlig den begrænsede rækkevidde pr. opladning. I dag kan en elbil typisk tilbagelægge 75-100 km pr. opladning. Med avancerede batterier kan rækkevidden formentlig øges til 2-300 km, måske endda mere. Det vil betyde at køretøjet er anvendeligt til de fleste formål - hvorvidt den potentielle køber også vil opleve den som sådan er en anden sag - men der vil også være anvendelsesformål hvor en sådan rækkevidde er utilstrækkelig. Og så bygger en sådan rækkevidde på den forudsætning at de avancerede batterier bliver udviklet og bliver markedsført til en acceptabel pris.

Dette kan give en rolle til brintdrift, som illustreres i figur 2. El- og brintdrift kan i denne opfattes som to forskellige måder at udnytte VE-baseret elektricitet på. Derfor kan sammenligningen forenkles til at tage udgangspunkt i den el der kommer fra de

elproducerende anlæg, mens der ikke tages hensyn til hvordan elektriciteten produceres.



*Figur 2. Illustration af sammenhængen mellem rækkevidde pr. opladning og specifikt elforbrug pr. km for forskellige drivsystemer: eldrift på dagens niveau (1), avanceret eldrift (2), brintdrevet forbrændingsmotor med CH<sub>2</sub>-/MeH-lagring (3), forbrændingsmotor med LH<sub>2</sub>-lagring (4), brændselscelle med CH<sub>2</sub>-/MeH-lagring (5) og brændselscelle el LH<sub>2</sub>-lagring (6). Det specifikke elforbrug er målt af produktionsanlæg.*

Figuren viser at eldrift baseret på dagens teknologiniveau (1) giver en meget effektiv energikæde, men også en begrænset rækkevidde. Avanceret eldrift (2) kan give væsentlig større rækkevidde og samtidig en endnu mere effektiv udnyttelse. Med den angivne rækkevidde vil køretøjerne i praksis være anvendelige til de fleste formål. På den anden side er rækkevidden ikke ubegrænset, og det er under alle omstændigheder usikkert hvordan potentielle købere vil vurdere denne rækkevidde. Samtidig er det en løsning der bygger på en forventet teknikudvikling til et prisniveau der ikke er kendt. Derfor kan der være god grund til også at forfølge andre teknologiudviklingsretninger, f.eks. baseret på brint.

Hvis der satses på brintdrevne forbrændingsmotorer vil der kunne opnås betydeligt større rækkevidder, men også med væsentlig dårligere energieffektiviteter. Med lagring som flydende brint (4) vil der kunne opnås de største rækkevidder men også med meget dårlige energieffektiviteter, mens lagring i gastanke eller metalhydrider (3) giver bedre energieffektivitet med en mere begrænset rækkevidde. Med brændselscelledrift (5 og 6) vil både effektivitet og rækkevidde blive forbedret. Med

gastank- eller metalhydridlagring (5) kan energikædens effektivitet komme tæt på dagens eldrift. Også her er der dog tale om en teknologi der kræver fortsat udvikling.

Hvis brintdrift skal have en rolle, er det vigtigt at de enkelte led i energikæden bliver effektiv. I den forbindelse vil der formentlig kun være en rolle på længere sigt hvis brændselsceller til en overskommelig pris bliver en mulighed.

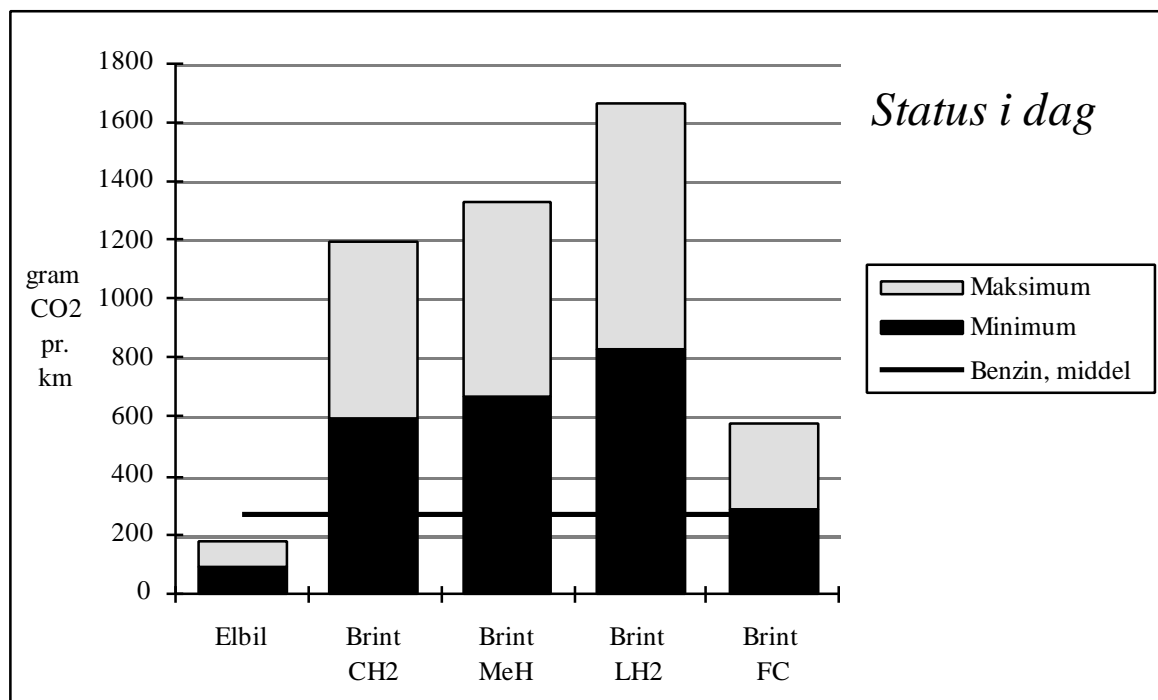
## **El og brint baseret på dagens elforsyning**

I praksis er det ikke sandsynligt at el- og brintdrevne køretøjer vil blive forsynet direkte fra vedvarende energikilder, idet de formentlig vil blive forsynet med el fra det offentlige elnet. Det gælder i særdeleshed for elbiler.

Derfor er det relevant at se hvilken energi- og miljøgevinst der er i dette tilfælde. Det drejer sig dels om primærenergiforbruget til fremstillingen af den nødvendige el, og dels om CO<sub>2</sub>-emissionen i forbindelse hermed. I forbindelse med sidstnævnte er det et problem ved dagens elforsyning at den altovervejende bygger på kul, der giver stor CO<sub>2</sub>-emission pr. energienhed. I den officielle energiplan, Energi 21 (Miljø og Energiministeriet 1996), forventes det imidlertid at der sker et gradvist skift til naturgas som elforsynings-brændsel i år 2030. Endvidere planlægges det at en betydelig del - ca. 50% - af elproduktionen sker på basis af vedvarende energi.

For drivsystemer baseret på el fra det offentlige elnet giver det en stor forskel for resultaterne om elektriciteten er produceret på kraftvarmeanlæg eller ved ren elproduktion (eller en mellemting), og i givet fald om kraftvarmefordelen tillægges el- eller varmesiden. For at vise spændvidde vises CO<sub>2</sub>-emissionen for begge yderpunkter.



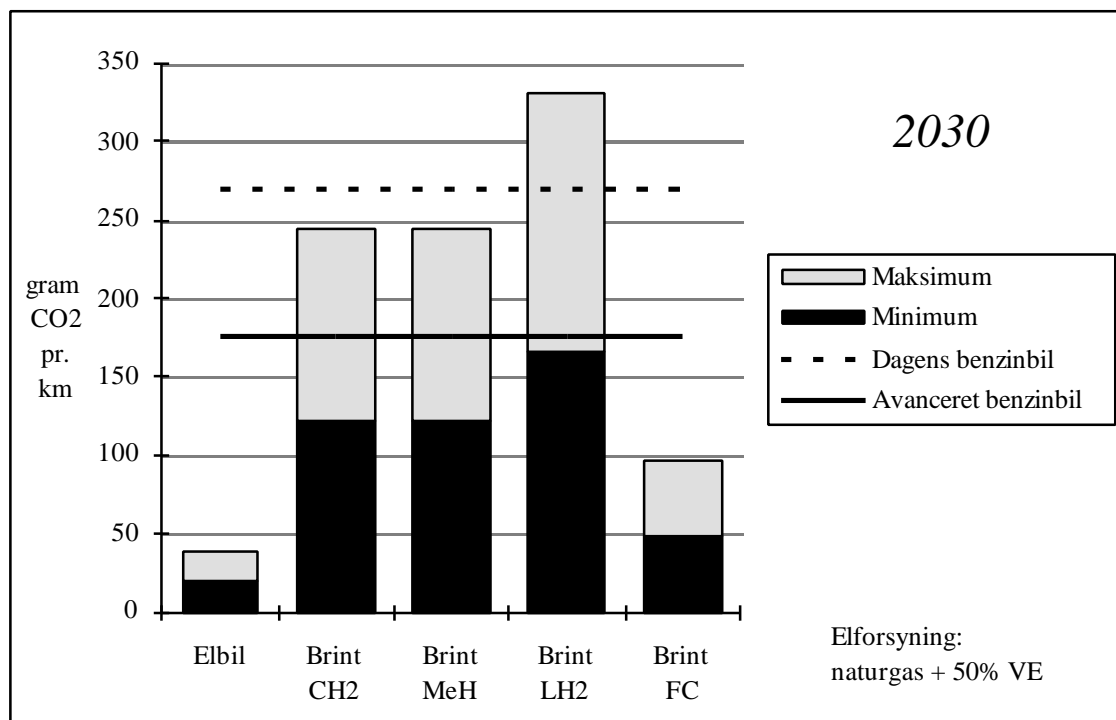


*Figur 3. Specifikt CO<sub>2</sub>-udslip pr. km for personbil med el- og brintdrift med dagens teknologistandard og baseret på dagens elforsyning. De viste drivsystemer er eldrift, brint-forbrændingsmotorer baseret på henholdsvis CH<sub>2</sub>-, MeH- og LH<sub>2</sub>-lagring samt brintdrift af brændselsceller (FC). Til sammenligning er vist CO<sub>2</sub>-emissionen for en benzindrevne bil (den vandrette linie). CO<sub>2</sub>-emissionen er beregnet under med og uden kraftvarmeudnyttelse (minimum og maksimum). Baseret på bykørselsmønstre.*

Figur 3 viser beregnede CO<sub>2</sub>-emissioner for drivsystemer baseret på dagens teknologiniveau og dagens elforsyning. Oplysninger om elsystemets effektiviteter og emissioner er baseret på beregninger fra DEFU (Christensen 1996). "Dagens teknologiniveau" dækker over forskellige udviklingsstader, idet der for eldrift er tale om teknologier der markedsføres, mens dette ikke er tilfældet for de øvrige.

Det ses at eldrift har lavere CO<sub>2</sub>-emissioner end den benzindrevne bil der sammenlignes med. Det gælder selv hvis kraftvarmen ikke forudsættes udnyttet. Derimod har de brintbaserede løsninger generelt større CO<sub>2</sub>-emissioner selv med kraftvarmeudnyttelse.

Figur 4 viser beregnede CO<sub>2</sub>-emissioner i år 2030 med avancerede transportteknologier og baseret på den planlagte elforsyning i år 2030 ifølge Energi 21. De avancerede drivsystemer er teknologier der kan forventes på markedet i løbet af 10-15 år hvis der internationalt gøres en særlig indsats for det. Også for benzindrevne biler er der forventet en betydelig teknologiudvikling, idet det antages at den kan køre ca. 50% længere på literen (ca. 20 km/liter i bykørsel). Det ses at CO<sub>2</sub>-emissionerne fra køretøjerne med brintdrevne forbrændingsmotorer nu er på niveau med den avancerede benzindrevne bil (afhængigt af om kraftvarmen regnes med eller ej) og lavere end for dagens benzindrevne bil. Dog er forbrændingsmotoren baseret på flydende brint dårligere end den avancerede benzindrevne bil. I denne beregning er den brintbaserede brændselscellebil under alle omstændigheder væsentlig bedre placeret CO<sub>2</sub>-mæssigt end benzindrevne biler.



*Figur 4. Specifikt CO<sub>2</sub>-udslip pr. km for personbil med forskellige drivsystemer. Figuren svarer til figur 3, bortset fra at den bygger på avancerede drivsystemer og den planlagte elforsyning i år 2030 samt at der også er medtaget en avanceret benzinbil i sammenligningen.*

Figur 3 og 4 bygger på bykørselsmønstre. Hvis samme beregning laves for kørsel ved en konstant hastighed 90 km/timen, vil eldrift (og brændselscelle-løsningen) stå relativt svagere.

Det skal understreges at man næppe vil vælge den her forudsatte elektrolyse-baserede brintproduktion for brindrift hvis der vælges løsninger baseret på fossil energi. Brintfremstilling ved naturgas-reformering kan forventes at være både billigere og mindre CO<sub>2</sub>-forurenende.

## **Reduktion af energiforbrug og CO<sub>2</sub>-emission gennem effektivisering**

Alternativt - eller som supplement - til VE-drivmidlerne kan energiforbruget og CO<sub>2</sub>-emissionerne reduceres ved at effektivisere køretøjerne. For at sætte VE-midlernes bidrag i relief gives der i det følgende en oversigt over besparelspotentialerne ad denne vej.

Der er en udbredt konsensus om at der er store potentialer med hensyn til at gøre biler og andre transportmidler mere energieffektive, selvom der er mange forskellige vurderinger af den konkrete størrelse af potentialerne.

Det første og mest direkte tilgængelige besparelspotentiale er det der kan opnås ved at vælge det bedste køretøj på markedet i sin kategori. Den mest benzinøkonomiske personbil på markedet er f.eks. ca. 25% mere effektiv end gennemsnitsbilen (i bestanden). Hvis man også accepterer et brændstofsift fra

benzin til diesel, er besparelspotentialt ca. 35-40%. Dette forudsætter dog at man accepterer "down-sizing", d.v.s. at der skiftes til en mindre model. I modsat fald er reduktionen væsentlig mindre.

Hvis man udvider perspektivet til at omfatte en vis teknisk udvikling der kan nås inden for en relativt kort årrække og uden større udviklingsmæssige revolutioner, er besparelsemulighederne i størrelsesordenen 30-40% - uden down-sizing (deCicco & Ross 1993; Friis Hansen 1997; Transportrådet 1997). EU's hensigtserklæring om at opnå at den gennemsnitlige solgte personbil om en halv snes år er en såkaldt "5-liters bil", d.v.s. en bil der bruger 5 liter benzin til at køre 100 km ligger i den samme størrelsesorden.

En mere radikal reduktion er "3-liters bilen", d.v.s. en bil der kører 33 km/liter, der bl.a. er materialiseret i den bilmodel, SmILE, der er udviklet på initiativ af Greenpeace (Greenpeace (1996)). Dette giver en besparelse på ca. 60% sammenlignet med dagens gennemsnitsbil, men SmILE, der er baseret på en Renault Twingo, repræsenterer en vis down-sizing sammenlignet med dagens gennemsnitsbil. Også forskellige europæiske bilindustrier har tilsvarende interne udviklingsmål, omend med mere sigte på forskningsresultater end på udvikling og markedsføring af praktiske modeller.

Det amerikanske Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV) er et fælles initiativ af henholdsvis de store amerikanske bilfabrikker og den amerikanske regering med det mål (bl.a.) at udvikle en personbil-prototype der kan køre 3 gange så langt på literen som dagens gennemsnitlige amerikanske personbil. Det svarer til en besparelse på 2/3 for en bil med specifikationer der svarer fuldstændigt til en gennemsnitlig personbil på det amerikanske marked (PNGV 1995a; PNGV 1995b). Der er dog ikke forpligtelser udover udviklingen af en prototype, og samtidig kritiseres den måde arbejdet i forbindelse med PNGV gribes an på for at føre til kortsigtede tekniske løsninger (Sperling 1997). Programmet har dog ikke mindst spillet en vigtig rolle for den hastige udvikling af brændselsceller til mobile formål i de seneste år.

Det største reduktionspotentialt er blevet påvist af Amory Lovins m.fl. fra Rocky Mountain Institute (RMI) i USA, der har skitseret og analyseret en såkaldt "hyperbil" (Moore and Lovins 1995; Lovins 1996). Det er en bil der, ifølge beregningerne, kan køre 50-60 km pr. liter og måske i de mere avancerede udgaver mere end 100 km/liter, svarende til en besparelse på 80-90% sammenlignet med dagens gennemsnit. På RMI understreger man kraftigt at der er tale om en bil der ikke på noget punkt går på kompromis med hensyn til præstationer, størrelse m.v. - et kriterium der forfølges næsten ud i det absurde. Man mener tilmed at bilen også vil være konkurrencedygtig i økonomiske termer. Ikke desto mindre er der tale om en bil der indtil videre kun findes på tegnebrættet.

Opsummerende kan potentialerne for energibesparelse og CO<sub>2</sub>-reduktion gennem effektivisering opgøres til op til 80-90%.

## **Konklusion**

Der har i Danmark især været fokuseret på de flydende biobrændstoffer (rapsolie, etanol, metanol) i debatten om alternative drivmidler, men meget tyder på at el- og brintdrift generelt er mere hensigtsmæssige løsninger, ikke mindst fordi biobrændstofferne er meget arealkrævende.

Eldrift er især blevet set som et middel til at forbedre transportens lokale miljøeffekter, mens der har været større usikkerhed om de samlede energi- og miljøeffekter. Men eldrift baseret på el fra VE-kilder (vind, solcelle m.v.) repræsenterer en meget effektiv energikæde, og der er som regel også betydelige energi- og miljøgevinster ved eldrift på basis af konventionelle elforsyning. Det forudsætter dog dels at elektriciteten produceres så rent og effektivt som muligt, og dels at køretøjerne udnytter strømmen effektivt. Den overvejende kulbaserede danske elforsyning bevirker at CO<sub>2</sub>-reduktionen er mindre end energibesparelsen i relativt mål. Men der opnås en CO<sub>2</sub>-reduktion selv baseret på dagens elforsyning.

Brintdrevne forbrændingsmotorer repræsenterer en væsentlig mindre effektiv energikæde end batteribaseret eldrift, men de muliggør større rækkevidder end der kan opnås med dagens batterier. Med brændselsceller kan både effektivitet og rækkevidde forbedres betydeligt, men systemeffektiviteten er normalt dårligere end ved batteridrift. Avancerede batterier kan dog på længere sigt reducere denne forskel, hvorfor brintens rolle på længere sigt er usikker. Endvidere skal brinten være VE-baseret for at opnå de meget væsentlige energi- og miljøgevinster.

De miljøgevinster der kan opnås ved hjælp af VE-drivmidler vil være lang tid om at slå igennem i køretøjsbestanden. Derfor kan VE-drivmidler ikke være et middel til at løse de kortsigtede problemer med at nå klimamål m.v. (f.eks. i 2005). Derimod udgør de et væsentligt langsigtet virkemiddel, der kan bidrage til at give bedre handlemuligheder på CO<sub>2</sub>-området. De erstatter ikke andre initiativer på transportområdet, bl.a. fordi der er en del trafikale problemer der ikke bliver løst af at skifte til renere drivmidler.

## Referencer

- Bang, Jon R. & Erling Holden (1991): "Energiforbrug og relative CO<sub>2</sub>-udslipp ved utvinning, produktion, distribution og brug av tradisjonelle og alternative drivstoffer. En helhetlig vurdering". Teknologisk Institutt, Oslo.
- Christensen, Jørgen (1996): "Elbiler set i forhold til elforsyningen". DEFU, Lyngby.
- DeCicco, John and Marc Ross (1993): "An Updated Assessment of the Near-term Potential for Improving Automotive Fuel Economy". American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington, DC.
- DeLuchi, Mark A. m.fl. (1989): "Electric Vehicles: Performance, Life-Cycle Costs, Emissions, and Recharging Requirements". Transportation Research-A, Vol. 23A, No. 3, p. 255-278.
- DeLuchi, Mark A. (1992): "Hydrogen Fuel Cell Vehicles". Institute of Transportation Studies, University of California, Davis.
- Ecotrafic (1992): "The Life of Fuels". Stockholm.
- Flavin, Christopher & Nicholas Lenssen (1995): "Power Surge. Guide to the Coming Energy Revolution". Worldwatch Institute, Washington DC.
- Friis Hansen, Ken (1997): "'Bilen & Miljøet'. Teknologikatalog". DTI Energi, Motorteknik, Århus.
- Greenpeace (1996): "The SmILE Concept. The Technology". Hamburg.
- Jørgensen, Kaj (1996): "Analyse af brintdrift i det danske trafiksystem". Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet, Lyngby.

- Jørgensen, Kaj (1997): "Transport and Sustainability - with Special Emphasis on Grocery Distribution". Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet, Lyngby (ikke publiceret).
- Jørgensen, Kaj og Lars Henrik Nielsen (1997): "Alternative drivmidler og bæredygtig udvikling". Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet, Lyngby & Systemanalyseafdelingen, Forskningscenter Risø Roskilde.
- Lovins, Amory B. (1996): "Hypercars: The Next Industrial Revolution". EVS13, Osaka, October, {}.
- MacKenzie, James J. (1994): "The Keys to the Car. Electric and Hydrogen Vehicles for the 21st Century". World Resources Institute, Washington.
- Miljø og Energiministeriet (1996): "Energi 21". København.
- Moore, Timothy C. & Amory B. Lovins (1995): "Vehicle Design Strategies to Meet and Exceed PNGV Goals". SAE Special Publications No. 1105, pp. 79-121.
- Jørgensen, Kaj (1997): "Transport and Sustainability - with Special Emphasis on Grocery Distribution". Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Bygninger og Energi, Lyngby.
- Ogden, Joan M. & Joachim Nitsch (1993): "Solar Hydrogen". I: T. B. Johansson m.fl. (eds.): "Renewable Energy - Sources for Fuels & Electricity", pp. 925-1009, Island Press, Washington.
- Ogden, Joan (1997): "Infrastructure for Hydrogen Fuel Cell Vehicles: A Southern California Case Study". World Car Conference 1997, 19.-22. januar, pp. 316-330.
- Pescka, Walter (1992): "Liquid Hydrogen. Fuel of the Future". Springer-Verlag, Wien & New York.
- PNGV (1995a): "The PNGV Program Plan". Washington, DC.
- PNGV (1995b): "Inventions Needed". Washington, DC.
- Sperling, Daniel (1995): "Future Drive. Electric Vehicles and Sustainable Transportation". Island Press, Washington, D.C.
- Sperling, Daniel (1997): "Can Industry-Government Partnerships Produce the Next Generation Vehicles?". 30th ISATA, Plenary Session, Firenze, 16.-19. juni, pp. 11-19.
- Transportrådet (1997): "Mere miljøvenlige biler - tekniske muligheder og politiske tiltag" (rapport nr. 97-04. København).