

## Køretøjer på el fra vedvarende energi

### *Baggrund og problemstilling*

De vigtigste energibærere for vedvarende energi i transportsektoren er elektricitet, brint, biobrændstoffer og biogas. Af disse kan brint og el opfattes som hørende til en samlet gruppe med mange fællestræk, og det fælles karakteristikum at de kan baseres på mange energikilder og også at de i praksis efter al sandsynlighed vil indgå i et system. En af de vigtigste veje til fremstilling af brint går via el og tilsvarende for den modsatte vej. De to er fælles om at være særdeles fleksible med hensyn til energikilder, og de repræsenterer begge muligheden for energieffektiv udnyttelse af ressourcerne med særdeles gode virkninger for lokalmiljø, herunder støj. Heroverfor står ikke mindst biobrændstofferne som muligheder der hænger sammen med biomassen (eller fossile energikilder) som ressource.

På den anden side har både el og brint som drivmiddel en del ulemper der ligger hindringer i vejen for deres udbredelse, i hvert fald som generel drivmiddel. Disse gør for det første at det ikke er uproblematisk at satse på disse drivmidler i fremtidens transport, eller med andre ord at det ikke er sådan at disse drivmidler overflødiggør andre virkemidler til reduktion af transportens miljøproblem, som fx. reduktion af transportmængden, skift til mere miljøvenlige transportmåder og ”længere-på-literen” foranstaltninger for de enkelte transportmidler. For det andet betyder det at det er vigtigt at analysere el- og brintdriftens problemer med henblik på dels at finde den bedste løsning, dels at få et realistisk vurdering af de nødvendige virkemidler for at realisere disse løsninger. I dag er der ikke én løsning der tegner sig som den bedste hverken mellem el og brint eller inden for disse. Og heller ikke for den fremtidige udvikling inden for de forskellige felter tegner der sig nogen entydig udvikling, der kan forventes at afklare situation – så meget som der er tale om mange dimensioner i valget. Udviklingen er fx afhængig af de instrumenter der bringes i spil for at fremme de forskellige løsninger, udover af udviklingen inden for andre felter.

For el-, hybrid- og brintdrift beskrives de centrale muligheder overbliksmæssigt her. Der tages udgangspunkt i elektriciteten som den leveres fra elnettet, mens der ikke går i dybden med hvorledes denne el fremstilles og distribueres. For det første er der i den stationære del af energikæden en forskel mellem om elektriciteten anvendes direkte som drivmiddel eller om den konverteres til brint, normalt ved elektrolyse. I dag anvendes der almindeligvis alkalisk elektrolyse med en relativt lav effektivitet, men der er mulighed for langt højere effektiviteter i avancerede elektrolysetyper som polymer-elektrolyse (SPE) eller højtemperatur-elektrolyse.

Med el som drivmiddel er de vigtigste muligheder batteri-ekøretøjet (BEV) og plugin-hybridkøretøjet (PHEV). Sidstnævnte dækker over en række meget forskellige drivsystemer. Ved siden af PHEV er der de ikke-nettilsluttede hybridbiler (HEV), fx Toyota Prius. De hverken kan eller skal tilsluttes elnettet, og hører derfor i princippet ikke hjemme i nærværende sammenhæng. De kan dog i princippet drives med brint (eller andre alternative drivmidler) som brændstof, selvom det ikke har været på tale hidtil. Man kan dog forestille sig det som en mulighed på længere sigt, specielt hvis brændselscellen ikke får sit gennem

Med brint som drivmiddel er de vigtigste muligheder anvendelse i almindelige forbrændingsmotor (ICE) eller i køretøjer drevet af brændselscelle-elmotor-systemer (FCEV). På tværs af dette kan brinten lagres ombord på en række forskellige måder med den hovedskillelinje at brinten kan være på enten gasformig eller flydende form (LH2). Sidstnævnte giver mulighed for de største rækkevidder og kan også give nemmere drift af brintdrift af ICE, men samtidig har den en særdeles dårlig energiøkonomi først og fremmest pga. energitab ved flydendegørelsen. En variant af FCEV-løsningen er at benytte indirekte brintdrift, hvor et flydende drivmiddel, fx benzin, diesel, metanol, konverteres til brint ombord i køretøjet. Denne mulighed har dog indtil nu haft begrænset succes og har også et betydeligt energitab.

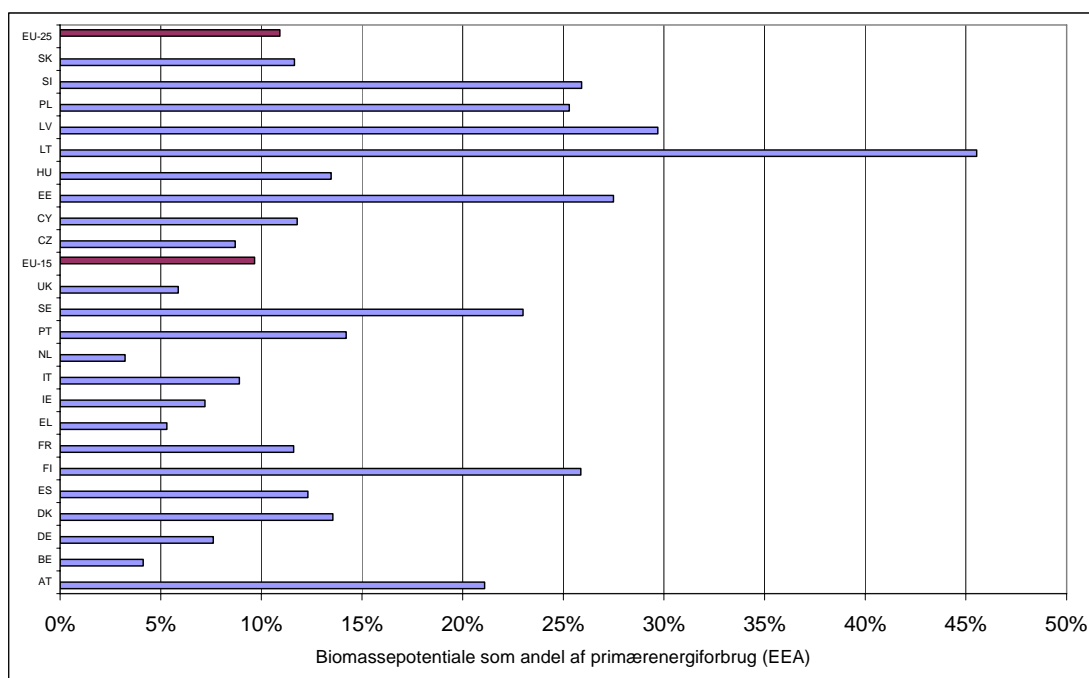
Det gælder for alle de nævnte energibærere at de ikke i sig selv giver nogen garanti for at være baseret på vedvarende energi. De kan alle tænkes baseret helt eller delvist på fossile energikilder i stedet for vedvarende, og dette er i høj grad aktuelle muligheder, fx af økonomiske eller ressourcemæssige hensyn.

#### ***Vedvarende energi i transportsektoren - el eller biobrændstoffer***

Med henblik på indførelse af vedvarende energi i transportsektoren har biobrændstoffer flere fordelagtige sider der principielt tillader hurtig introduktion af dem og uden større krav til infrastruktur. Til forskel herfra tegner eldrift og især brintdrift sig som langsigtede muligheder med store krav til infrastruktur. De forudsætter at der gøres en store indsats for fremme udviklingen, og selv i tilfælde heraf er det usikkert om der kommer et gunstigt udfald.

Biobrændstoffer er på den anden side væsentligt mindre fleksible hvad angår mulige vedvarende energiresourcer end både el og brint. Derfor er det centralt at vurdere det ressourcemæssige grundlag. I praksis er det kun biomasse der kan danne grundlag for det blandt de vedvarende energiresourcer. I denne sammenhæng har der været en del fokus på specielt etanolens konkurrence med føde gennem at være baseret på korn eller lignende. Derfor har der været fokus på at den teknologiske udvikling gennem fremme af 2G-anlæg skal eliminere dette problem. Imidlertid er der ved siden af denne konflikt også en mere grundlæggende begrænsning, der hænger sammen med at biomassen er en begrænset ressource selv hvad angår de teoretiske ressourcer. Derfor er det vigtigt at vurdere disse ressourcer, hvilket bl.a. Det Europæiske Miljøagentur har gjort (European Environmental Agency 2006).

EEA har vurderet biomasse-potentialet der kan anvendes til energiformål på et bæredygtigt grundlag for hvert enkelt land i EU-25 samt for EU-25 og EU-15 som helhed. Figur 1 viser dette potentiale sat i forhold til de pågældende enheders primærenergiforbrug. For Danmark svarer potentialet til ca. 14% af vores energiforbrug, mens det for EU som helhed drejer sig om ca. 10%. Der er således under alle omstændigheder tale om en begrænset ressource



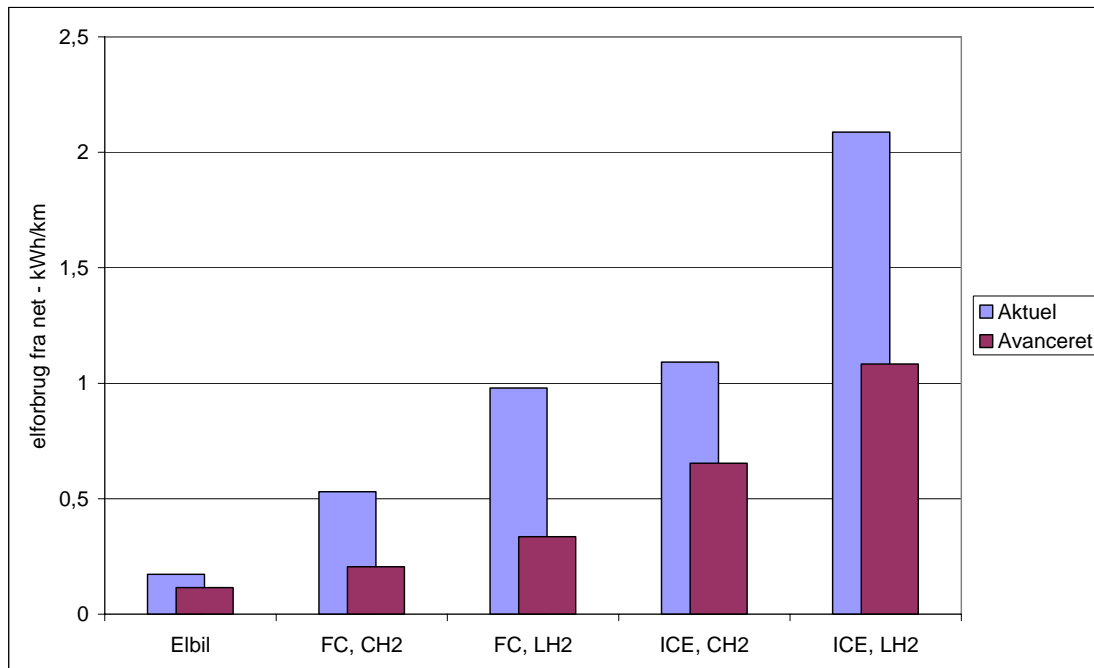
Figur 1

### ***Sammenligning af el og brint med hensyn til energiudnyttelse***

Figur 2 illustrerer en af papirets centrale problemstillinger, nemlig beregnede konverteringseffektiviteter for el fra elnettet der så udnyttes til enten eldrift eller brintdrift i enten ICE-køretøjer eller FCEV. For brint ses på ombordlagring som dels flydende brint (LH2) og i tryk-tanke. For alle 5 muligheder ses på dels det aktuelle teknologiske niveau, dels et avanceret niveau der kan opfattes som mulighederne på 20-30 års sigt, hvis der gøres en indsats for at fremme udviklingen. Det er vigtigt at være opmærksom på at der er stor usikkerhed på beregningerne og at de for begge teknologiniveauer skal opfattes som eksempel på et bredt spektrum.

Følgende hovedforudsætninger er brugt (Horstmann & Jørgensen 1997, Nielsen & Jørgensen 1997, Gaines & Cuencia 2000, Graham 2001, Delucchi & Lipman 2001, Ogden et al 2001, Sørensen et al 2001, Duvall 2002, Lipman & Delucchi 2003, Delucchi 2003, Koljonen et al 2004, Ogden et al 2004, Edwards et al 2007):

- brint-elektrolyse: 75-92%
- effektivitet af opladning af batterier: 95%
- batteri-effektivitet: 70-85% (stærkt afhængigt af batteritype)
- elmotor-effektivitet: 80-85% for dagens motorer og 90-92% for fremtidens (for både eldrift og FCEV)
- el-effektivitet for brændselsceller: 40-58% (ekskl. tab i elmotorerne)
- effektivitet af ICE, inkl. tomgangstab og tab i transmission: 15-18%
- effektivitet af brintlagre ombord: 93-100%
- effektivitet af brinttankning: 95-100%
- effektivitet af flydendegørelse af brint 70-72%
- regenerering af bremseenergi for elbilerne svarer til en forbedring af den samlede energi-effektivitet for køretøjet med 15-20%
- for FCEV antages bremsergenerering af forbedret køretøjets samlede effektivitet med mellem 0% (i dag) og 15% (på langt sigt).

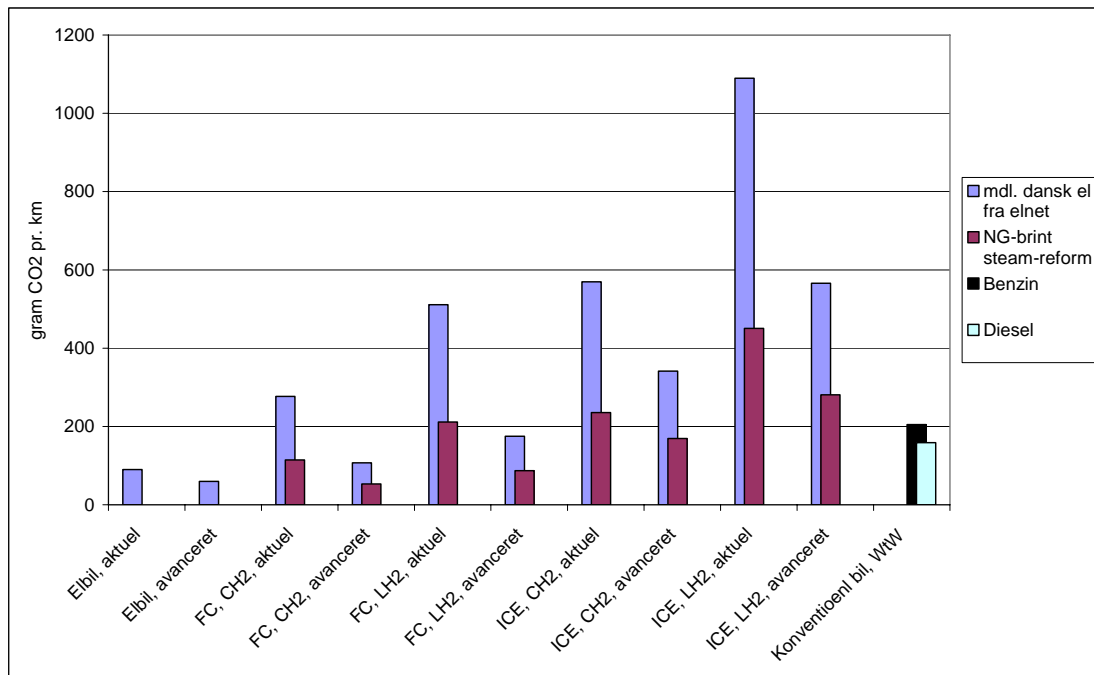


Figur 2

Det ses af figuren at brint-alternativerne over en kam er langt mindre effektive end elbilen. For et givet teknologiniveau er den dårligste brintløsning, ICE og flydende brint, en faktor 10, eller mere, dårligere end elbilen. Skift til FCEV og CH<sub>2</sub>-ombordlagring forbedrer hver især brintløsningen med ca. en faktor 2, og kombinationen af de to FCEV med CH<sub>2</sub>-ombordlagring er ca. 2-3 gange dårligere end elbilen for et givet teknologisk niveau.

Det er værd at notere at det eksempel på brintdrift i personbiler der aktuelt er længst fremme, nemlig BMW, er kendetegnet ved såvel ICE som flydende brint. Det hører dog med til denne historie, at dette er en luksusmodel, hvor høje omkostninger spiller en mindre rolle. I forbindelse med en bredere udbredelse af brintdrift i transportsektoren vil der dog efter al sandsynlighed være et betydeligt fokus på omkostningsniveauet, ikke mindst i den indledende periode med høje brintomkostninger.

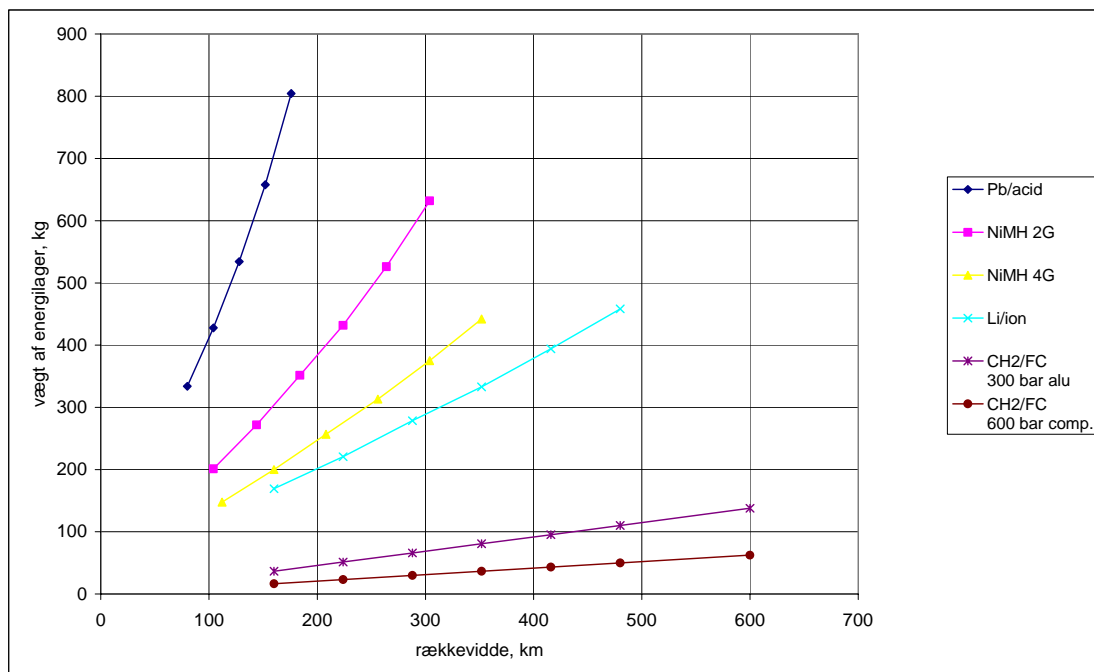
Der er generelt ikke fokus på tabene i forbindelse med fremstilling af el i dette papir, men for at sætte de beregnede tal ind i en sammenhæng viser figur 3 estimerede CO<sub>2</sub>-emissioner hvis strømmen tænkes at komme fra gennemsnitlig dansk elproduktion (Energistyrelsen 2007). Her elbilen væsentlig bedre end konventionelle benzin- og dieseldrevne biler, mens hovedparten af brintmulighederne er ringere. På kortere sigt er det dog mere sandsynligt at brintbaseret transport i større omfang vil blive baseret på andre fremstillingsmåder en elektrolyse ved hjælp af el fra elnettet, først og fremmest ved reformering af naturgas. Derfor viser figuren også dette. Det hænger bl.a. sammen med at elektrolyse-brint på alle måder er en kostbar løsning. På længere sigt forventes det den gennemsnitlige danske elproduktion at blive betydeligt renere hvad angår CO<sub>2</sub>-udledning. Desuden er det med henblik på anvendelse i både el- og brintdrift rimeligt at antage at den benyttede el er bedre end gennemsnittet fordi de muliggør udnyttelse af en større andel vedvarende energi i elsystemet.



Figur 3

### Rækkevidde-spørgsmålet

Figur 4 viser beregnet vægt af energilager for forskellige batterityper og brintlager for en typisk dansk personbil med forskellige rækkevidde. De viste batterityper er hhv. bly (Pb/acid), NiMH 2. generation, NiMH 4. generation og Li/ion. Rækkevidden er bestemt af dels energitætheden i ombordlageret, dels køretøjets effektivitet med hensyn til energiforbrug. Elbilens drivsystem er i størrelsesordenen en faktor 2 mere effektiv en typisk brintbaserede drivsystemer (væsentlig mere ved sammenligning med ICE-baserede system). Men samtidig er forskellen i det specifikke energiindhold i batterierne endnu større. Selv avancerede batterier vil formentlig være en faktor 10 ringere i så henseende end CH<sub>2</sub>-lagring. Figuren viser konsekvensen: med CH<sub>2</sub>-lager vil kunne opnås rækkevidder af samme størrelsesorden som konventionelle biler med moderate vægtforøgelse, hvis ellers de kan indpasses fysisk i bilen. Dette gælder i særdeleshed hvis lagre med højere tryk kan blive standard. For batterierne derimod vil der være tale om dramatiske vægtforøgelse selv for begrænsede rækkevidder. De viste eksempler på batterier til biler skal opfattes som tænkte eksempler, der næppe lader sig udføre i praksis. Selv med avancerede batterier (NiMH 4G og lithium-batterier) tegner en rækkevidde på meget over 300-400 km ikke realistisk på denne baggrund.



Figur 4

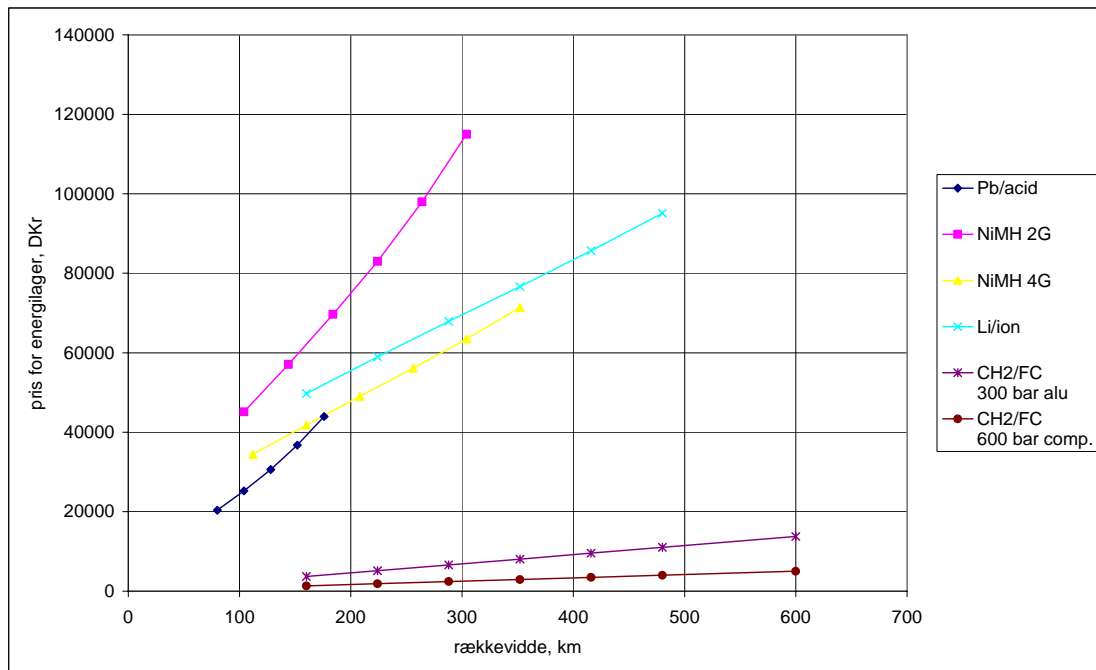
#### ***Omkostningsniveau – batteri, brændselscelle***

De centrale omkostningselementer for el- og brint/brændselscelledrift er henholdsvis batteriet for eldrift og til dels for plugin-hybriddrift og brændselscellen for sidstnævnte. Der er dog også andre vigtige faktorer, fx elmotoren, kontrol- og effektelektronik samt ombordlagring af brint. For flere af disse andre elementer er der faktisk sket markante fremskridt i denne periode. Dette gælder i særdeles for kontrol-/effektelektronik og i forlængelse heraf de elmotorer der kan anvendes, hvilket er af betydning for både el- og brændselscelledrift.

For både brændselsceller og (især) batteriet er det udover selve produktionsomkostningerne også levetiden der har givet alvorlige problemer for bilens omkostninger.

For batterierne er der sket en vis udvikling, men det drejer sig først og fremmest om at bedre, men også dyrere, batterityper har taget over – nemlig NiMH-batterier i stedet for bly-batterier, med NiCd-batterier som mellemtrin i Europa (Kalhammer et al 2000, Duvall 2004). Derudover er der også sket en udvikling for den nye batteritype, NiMH.

Figur 5 viser beregnede omkostninger for samme energilagerudvalg. Her tegner sig samme billede som for vægten at batterier har høje omkostninger samtidig med lave rækkevidder. Ganske har elbilerne dog også meget lavere løbende omkostninger, men dette er ikke nok til at opveje forskellen.

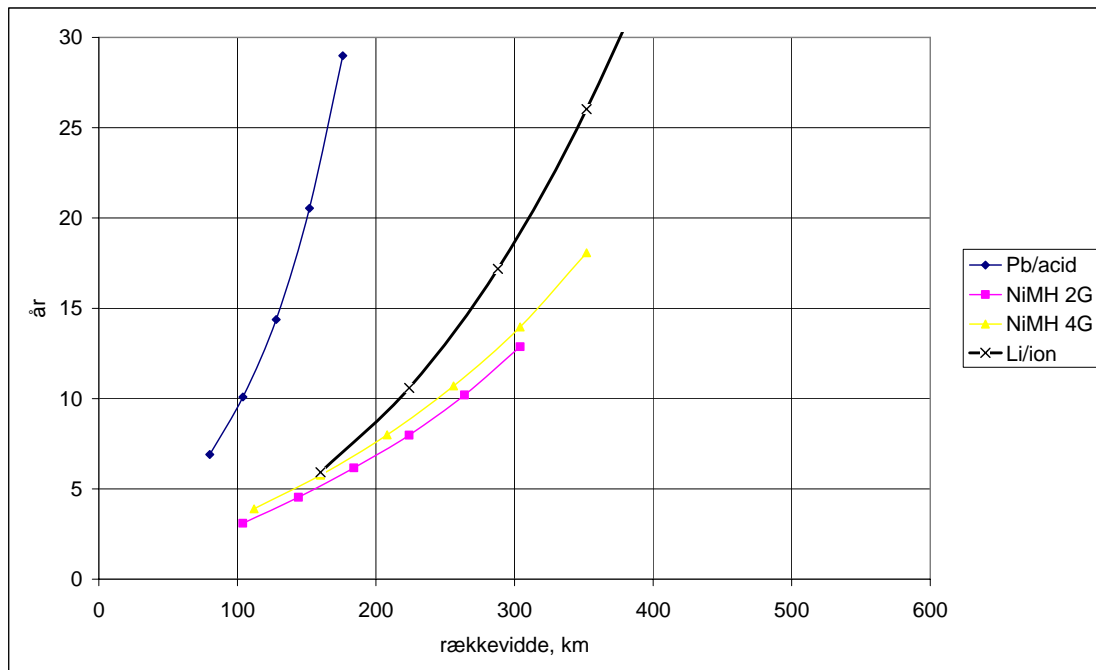


Figur 5

Batterierne anvendes også til mange andre anvendelser end som traktionsbatteri, fx elværktøj, bærbare computere, telefoner, fotoapparater og meget andet. Også for disse anvendelser er der naturligvis et pres for at reducere omkostningsniveauet, der kunne tænkes at smitte af på udviklingen af traktionsbatteriet. Dette undergraves dog af den omstændighed at omkostningsniveauet, opgjort pr. energienhed, for disse anvendelser generelt ligger flere gange over niveauet for traktionsbatterier, selv når man sammenligner med dagens omkostninger, og ikke eventuelle fremtidige omkostningsmål.

Med PHEV kan man reducere problemerne omkring batterierne betydeligt og måske også nok til at finde en vej frem for denne mulighed (Duvall 2004). Man har dog ikke ubegrænsede muligheder herfor, idet man ved at reducere batteriet for meget risikerer at en uforholdsmæssigt stor del af kørslen sker med forbrændingsmotoren. Mulighederne for at undgå dette kan også begrænses ved andre hensyn, fx at man undgår opladning af batteriet ombord af energieffektivitetshensyn.

Figur 6 illustrerer problemstillingen om batterilevetiden for elbiler. Den viser beregnet typisk levetid for forskellige batterityper i en typisk personbil med gennemsnitlig årskørsel for dansk personbil, nemlig 20.300 km. Nøglefaktoren der bestemmer dette er antallet af afladningscykler for batteriet, og dermed kan man øge batterilevetiden (pr. km eller pr. år) ved at sikre at elbilen er så energieffektiv som mulig.



Figur 6

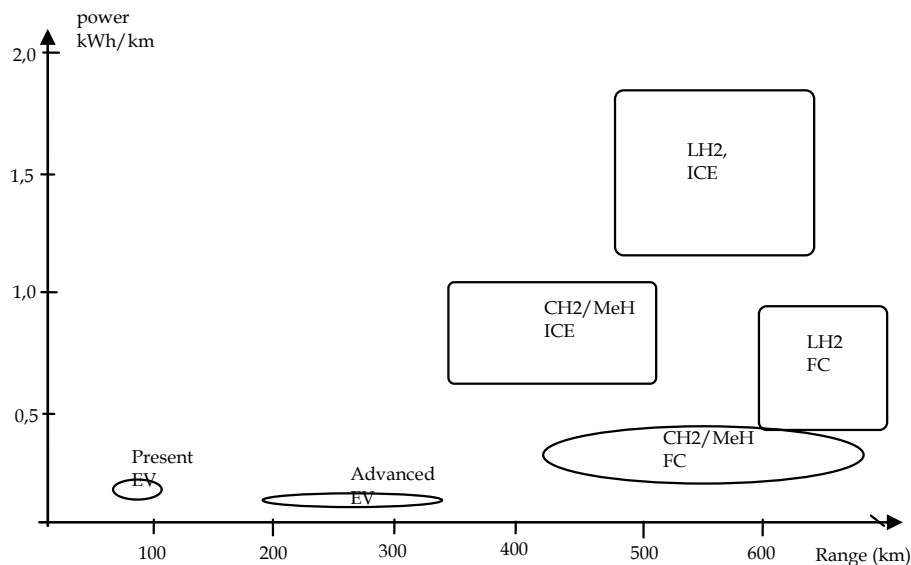
For brændselsceller er der sket en dramatisk forbedring hvad angår både fysiske forhold (især vægt/volumen), energimæssige, driftsmæssige og omkostningsmæssige forhold. Hvis brændselscellen skal være umiddelbart konkurrencedygtig med de konventionelle drivsystemer, kræves der dog en massiv yderligere udvikling specielt for omkostningsniveauet. Dette kan tænkes reduceret dels gennem teknologisk udvikling, dels gennem volumenproduktion.

I forlængelse af den voldsomme udvikling for brændselscellen har der nærmest været stilstand for H<sub>2</sub> i ICE i transportmidler med undtagelse af den nævnte BMW-model.

### ***Sammenligning af el og brint***

Figur 7 illustrerer problemstillingerne omkring rækkevidde og energieffektivitet for el- og brintkøretøjer. Elkøretøjerne er væsentligt mere energieffektive end brintmulighederne, men samtidig risikerer man at deres rolle begrænses eller direkte forsøg på at udbrede dem slår fejl, hvis man overser der begrænsninger. Der er tilsyneladende væsentlig større muligheder hvis man kombinerer el-/hybridbiler (BEV/PHEV) med de mest effektive brintløsninger - forudsat at udviklingen af disse lykkes.





Figur 7

### Referencer

Amos, Wade, 1998. *Costs of Storing and Transporting Hydrogen (TP-570-25106)*, NREL, Department of Energy, Golden, Colorado.

Crawley, G., 2007. *Fuel Cell Today Market Survey: Light Duty Vehicles*, [www.fuelcelltoday.com](http://www.fuelcelltoday.com).

Delucchi, Mark A., 2003. A lifecycle emissions model (LEM): lifecycle emissions from transportation fuels, motor vehicles, transportation modes, electricity use, heating and cooking fuels, and materials - documentation of methods and data". Institute of Transportation Studies, UC Davis, Californien.

Delucchi, Mark A. & T. Lipman, 2001. An Analysis of the Retail and Lifecycle Cost of Battery-Powered Electric Vehicles, *Transportation Research Part D*, Vol. 6, pp. 371-404.

Duvall, M., 2002. *Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options for Compact Sedan and Sport Utility Vehicles*, EPRI, Palo Alto, California.

Duvall, M., 2004. *Advanced Batteries for Electric-Drive Vehicles*, EPRI, Palo Alto, California.

Edwards, R. et al, 2007. *Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context (the JEC Study): CONCAWE, EUCAR and the Joint Research Centre of the EU Commission (Version 2c)*, Ispra, Italien.

Energistyrelsen, 2007: Energistatistik ([www.ens.dk](http://www.ens.dk)).

European Environmental Agency (2006), "How much bioenergy can Europe produce without harming the environment" (EEA Report 7/2006). København.

- Gaines, Linda & Roy Cuenca, 2000. *Costs of Lithium-Ion Batteries*, Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory, Illinois.
- Graham, R., 2001. *Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options*, EPRI, Palo Alto, California
- Horstmann, Jørgen, 2005. *Elbiler i Danmark - Miljøprojekt nr. 1006 (in Danish)*, Miljøstyrelsen, København.
- Horstmann, Jørgen & Kaj. Jørgensen, 1997. *Perspektiver for elbiler i Danmark (in Danish)*, Orientering fra Miljøstyrelsen, København.
- Jørgensen, Kaj, 2006, Perspektiver for biomassen i transportsektoren.
- Kalhammar, F et al, 2000, *Advanced Batteries for Electric Vehicles: an assessment of performance, cost and availability*, State of California Air Resources Board, 2000.
- Koljonen, Tiina et al, 2004. *Systems Analysis and Assessment of Technological Alternatives for Nordic H2 Energy Foresight*, Forskningscenter Risø, Afdeling for Systemanalyse, Roskilde, 2004.
- Kempton, Willett & Jasna Tomić, 2005a. Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue, *Journal of Power Sources*, Vol. 144, pp. 268-279.
- Kempton, Willett & Jasna Tomić, 2005b. Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy, *Journal of Power Sources*, Vol. 144, pp. 280-295.
- Lipman, Timothy & Daniel Sperling, 1996. *Forecasting Electric Vehicle Costs with Experience Curves*, University of California, Berkeley.
- Lipman, Timothy & Mark A. Delucchi, 2003. *Hybrid-Electric Vehicle Design Retail and Lifecycle Cost Analysis. Final Report*. Energy and Resources Group, University of California, Berkeley, California.
- Nielsen, Lars H. & Kaj Jørgensen, 1997. *Electric Vehicles and Renewable Energy in the Transport Sector – Energy System Consequences*, Forskningscenter Risø, Systemanalyse, Roskilde.
- Ogden, Joan et al, 2001. *Toward a Hydrogen-Based Transportation System*. Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University, New Jersey, 2001.
- Ogden, Joan et al, 2004. Societal Lifecycle Costs of Cars with Alternative Fuels/Engines. *Energy Policy*, Vol. 32, pp. 7-27.
- Padró, C.E.G. & V. Putsche, 1999. *Survey of the Economics of Hydrogen Technologies (NREL/TP-570-27079)*. NREL, Department of Energy, Golden, Colorado.

Sørensen, Bent et al, 2001. *Scenarier for samlet udnyttelse af brint som energibærer i Danmarks fremtidige energisystem (in Danish, English summary)*. IMFUFA, Roskilde Universitetscenter, Roskilde.