

# HYDROGEN

Morten Simonsen

Vestlandsforskning

21/1/2010

## Innhold

Hydrogen.....	4
Innledning.....	4
CUTE-prosjektet.....	4
Hvor kommer hydrogenet fra? .....	5
Framstilling av hydrogen.....	6
Elektrolyse.....	6
Damp-reformering.....	8
Hydrogen og motorteknologi .....	10
Hydrogen i forbrenningsmotor .....	10
Brenselcelle.....	11
Drivverk for brenselcelle .....	14
Transport av hydrogen.....	14
Fylling og interne tap.....	14
Energiiinnhold i hydrogen kontra diesel.....	16
E energibruk til framdrift for hydrogen-kjøretøy.....	16
Effektivitet.....	19
Elektrolyse av vann.....	19
Damp-reformering.....	19
Brenselcelle.....	20
Hydrogen forbrenningsmotor .....	21
Produksjonsanlegg.....	22
Oppsummering .....	23
Tapsmultiplikatorer.....	24
Norsk vannkraft.....	26
Naturgass.....	27
Elektrisitet fra gasskraftverk.....	29
Oppsummering.....	31

## Tabeller

Tabell 1 Kjørelengde og forbruk pr by i CUTE-prosjektet.....	17
Tabell 2 Effektivitet for ulike produksjonsanlegg i CUTE-prosjektet .....	22
Tabell 3 Effektivitetstall for hydrogen.....	25
Tabell 4 Beregning av brutto direkte energibruk for hydrogenbuss med hydrogen produsert fra norsk vannkraft.....	26
Tabell 5 Kjedevirkningsgrad for hydrogenbuss med hydrogen produsert av norsk vannkraft.....	27
Tabell 6 Brutto direkte energiforbruk og virkningsgrad for personbil med brenselcelle og hydrogen produsert med elektrolyse.....	27
Tabell 7 Beregning av brutto direkte energibruk for hydrogenbuss med hydrogen produsert ved gassreforming fra naturgass.....	28
Tabell 8 Kjedevirkningsgrad for buss med brenselcelle på hydrogen fra gass-reforming .....	28
Tabell 9 Brutto direkte energiforbruk og virkningsgrad for personbil med brenselcelle og hydrogen produsert med gass-reforming.....	29
Tabell 10 Beregning av brutto direkte energibruk for hydrogenbuss med hydrogen produsert ved elektrolyse og elektrisitet fra gasskraftverk.....	29
Tabell 11 Kjedevirkningsgrad for buss med brenselcelle på hydrogen fra elektrolyse med elektrisitet fra gasskraftverk .....	30
Tabell 12 Brutto direkte energiforbruk og virkningsgrad for personbil med brenselcelle og hydrogen produsert med elektrolyse og elektrisitet fra gasskraftverk.....	30
Tabell 13 Brutto direkte energibruk kWh pr vognkm for buss og personbil med hydrogen under ulike forutsetninger om energikilde.....	31
Tabell 14 Brutto direkte energibruk kWh pr passasjerkm for buss og personbil med hydrogen under ulike forutsetninger om energikilde.....	31
Tabell 15 Kjede-virkningsgrad for buss og personbil med hydrogen under ulike forutsetninger om energikilde.....	31

## Figurer

Figur 1 Elektrolyse .....	7
Figur 2 Proton-exchange-membrane brenselcelle .....	12
Figur 3 Sammenheng mellom energiforbruk pr 100 km og antall km i drift for CUTE-prosjektet .....	18
Figur 4 Hydrogentap ved produksjon- og fyllingsanlegg i CUTE-prosjektet .....	22
Figur 5 Kjedevirkningsgrad i prosent for buss og bil med hydrogen fra ulike energikilder og produksjonsmåter.....	31
Figur 6 Energiforbruk kWh pr passasjerkm for brenselcelle-drevet buss med hydrogen produsert fra ulike energikilder .....	32
Figur 7 Energiforbruk kWh pr passasjerkm for brenselcelle-drevet personbil med hydrogen produsert fra ulike energikilder .....	33

## Likninger

Likning 1 Beregning av tapsmultiplikator .....	24
Likning 2 Beregning av effektivitetsprosent fra tapsmultiplikator.....	24

# Hydrogen

## Innledning

Hydrogen er et av de hyppigst forekommende kjemiske element på jorda. Hydrogen finnes imidlertid ikke i ren form og kan heller ikke utvinnes fra mineraler. Hydrogen finnes som reaksjon med andre kjemiske element, for det meste som vann sammen med oksygen og i hydrokarboner sammen med karbon. Hydrogen kan utvinnes ved å spalte hydrogen fra andre kjemiske element, for eksempel gjennom elektrolyse av vann hvor oksygen og hydrogen skilles fra hverandre.

Hydrogen har lavere energitetthet pr volum enn diesel eller bensin. Hydrogen under 165,5 bar trykk med temperatur 20° C har et energiinnhold på 1 767 MJ/m<sup>3</sup> mens diesel har et energiinnhold på 36 500 MJ/m<sup>3</sup> og bensin har 32 900 MJ/m<sup>3</sup><sup>1</sup>. I flytende form i -253°C under trykk på 1 bar har hydrogen et energiinnhold på 8 530 MJ/m<sup>3</sup>. Hydrogen har derimot større energiinnhold pr vektenhet enn bensin og diesel. Hydrogen har 120,2 MJ/kg mens diesel har 42,6 MJ/kg og bensin har 43,8 MJ/kg. Følgelig har hydrogen mer m<sup>3</sup> pr kg (eller omvendt mindre kg per m<sup>3</sup>) enn diesel og bensin. Hydrogen som ikke er trykksatt har mindre energiinnhold enn hydrogen under trykk.

Siden hydrogen har lav energitetthet pr volum må den komprimeres og settes under trykk for å kunne lagres i tanker på størrelse med en bensintank. Større tanker vil selvsagt kreve mer energi til framdrift av kjøretøyet og dessuten redusere kjørekvalitetene. For at hydrogen skal kunne lagres i tanker med rimelig størrelse må hydrogen settes under trykk, opp mot 350 bar<sup>2</sup>.

Hydrogen kan også omdannes, lagres og transporteres i flytende form ved temperatur omkring -253°C. Denne omdanningen krever mye energi, og transport av flytende hydrogen med lastebil fra sentrale produksjonsanlegg medfører utslipp av CO<sub>2</sub>. Således vil lokal produksjon av hydrogen medføre lavere utslipp langs hele kjeden enn sentrale utslipp<sup>3</sup>.

Hydrogen kan fungere som buffer for fornybare energikilder. Disse kan ikke skrus av og på, de produserer elektrisitet når det er sol eller vind. Denne elektrisiteten kan lagres i hydrogen og brukes etter behov. Hydrogen fungerer på denne måten som lagret fornybar energi. Hydrogen kan dermed øke tilgjengeligheten av fornybar energi<sup>4</sup>.

## CUTE-prosjektet

CUTE står for Clean Urban Transport for Europe er et EU-prosjekt som tester ut hydrogenbusser i ni Europeiske byer i sju forskjellige land. Byene er Amsterdam, Barcelona, Hamburg, Stockholm, Madrid, Stuttgart, Luxembourg, Porto, og London. I alle ni byer ble tre busser testet ut slik at til sammen 27 busser deltok i prosjektet. Alle byer bortsett fra London lagret hydrogen som komprimert

---

<sup>1</sup> <http://www.hydrogen.no/hydrogen/tekniske-data-og-sammenlikningstabeller-for-hydrogen>

<sup>2</sup> ibid., side 8.

<sup>3</sup> <http://www.sintef.no/Olje-og-energi/SINTEF-Energiforskning-AS/Xergi/Xergi-2003/Nr-1---mars/Hydrogen-som-eneigibarer/>

<sup>4</sup> [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/CUTE\\_Technology\\_Brochure.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf) , side 5

gass. London lagret hydrogen som flytende gass. Alle busser i alle byer brukte hydrogen i gassform komprimert til 350 bar til å drive brensel-celler i bussene <sup>5</sup>.

Mercedes-Benz konstruerte egne brenselcelle-busser til prosjektet basert på deres Citaro-modell. Bussene hadde en automatisk girboks. Bussene ble benyttet i vanlig lokal rutetrafikk. Bussene hadde to moduler med brenselceller med en samlet ytelse på 250 kW (335 hestekrefter). Testene med bussene ble utført i tidsrommet 2003-2005. Bussene veide 14 tonn <sup>6</sup>. Akseltrykket på forakselen er på 7,4 tonn mens trykket på bakaksel er på 12 tonn. Antall passasjer seter er om lag 30, avhengig av operatørens krav <sup>7</sup>. Karosseriet på bussene ble forsterket for å kunne frakte hydrogen-tanker. Den økte vekten av hydrogen-tanken ble kompensert med endringer i fjæringssystemet.

Fire av byene (Amsterdam, Hamburg, Barcelona og Stockholm) brukte anlegg for elektrolyse av vann til å produsere hydrogen. Madrid og Stuttgart brukte et anlegg for damp-reformering til å lage hydrogen mens 3 byer, Luxembourg, Porto og London ble forsynt av brukte sentrale anlegg som produserte hydrogen. Disse sentrale anleggene var enten elektrolyse-anlegg for vann, kjemiske anlegg eller raffineri. I de to siste tilfelle var hydrogen et bi-produkt av annen produksjon og ikke det primære produktet fra det sentrale anlegget.

I Amsterdam, Hamburg og Stockholm ble elektrisitet til elektrolyse levert fra strømkilder med grønne sertifikater. I Barcelona ble elektrisiteten tatt fra normalt strømnett <sup>8</sup>.

### Hvor kommer hydrogenet fra?

I 2000 ble det produsert 60 milliarder kubikkmeter (Nm<sup>3</sup>) i de da 15 medlemsland i EU. Av dette ble 55% produsert som material for annen produksjon. Hydrogen brukes som råmaterial for produksjon av ammoniakk og brukes i produksjon av jern og stål. Hydrogen brukes også i produksjon av glass og elektronikk og til behandling av oljer og fett som brukes i matproduksjon <sup>9</sup>.

45% av alt hydrogen som ble produsert i EU i 2000 ble brukt som indirekte energi i petrokjemisk industri. Med indirekte energi menes her at hydrogen ble brukt som katalysator i produksjonen og ikke som en energi-bærer. Hydrogen ble med andre ord brukt til å sette i gang en prosess og ikke som direkte input i form av energi. Blant annet blir hydrogen brukt til å fjerne svovel fra diesel for å lage lav-svovel diesel som oppfyller utslippskrav i Europa og Nord-Amerika.

Det er blitt anslått at 2% av all produksjon i EU-15 hadde hydrogen som et bi-produkt <sup>10</sup>. Et av formålene med CUTE-prosjektet var å benytte denne hydrogen-kilden til å drive brenselceller i busser i stedet for å bli sluppet ut til luft. Selv om produksjonen som hydrogenet kom fra ikke brukte fornybare energikilder, vil hydrogen brukt som avfallsprodukt ikke kreve ytterligere energiforbruk for å kunne brukes som drivstoff i brenselcelle-busser.

---

<sup>5</sup> [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/DETAILED\\_SCREEN.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/DETAILED_SCREEN.pdf), side 16

<sup>6</sup> Dette er "curb weight" som inkluderer vekten av kjøretøyet, motorolje, kjøleveske samt full tank med drivstoff. Vekten av fører og passasjer er ikke inkludert. Se [http://en.wikipedia.org/wiki/Curb\\_weight](http://en.wikipedia.org/wiki/Curb_weight)

<sup>7</sup> [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/DETAILED\\_SCREEN.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/DETAILED_SCREEN.pdf), side 49

<sup>8</sup> ibid., side 24.

<sup>9</sup> ibid., side 10.

<sup>10</sup> ibid., side 10.

De siste 5% av hydrogen som ble produsert i EU-15 i 2000 ble brukt til produksjon av elektrisitet og varme.

På verdensbasis ble 48% av all hydrogen i 2000 produsert med naturgass som energikilde, 30% ble produsert med mineralolje og 18% med kull. De resterende 4% ble produsert med elektrisitet som energikilde<sup>11</sup>. Hydrogen er ikke selv en energikilde men en energibærer som overfører energi produsert med andre kilder.

## Framstilling av hydrogen

Produksjon av hydrogen skjer ved elektrolyse eller damp-reforming. Omforming av naturgass er den vanligste måten å produsere hydrogen på.

### Elektrolyse

Elektrolyse<sup>12</sup> er en elektrokjemisk prosess, det vil si at en kjemisk reaksjon blir igangsatt som ikke ville foregått uten bruk av elektrisk strøm. Denne kjemiske reaksjonen innebærer en separasjon av kjemiske element som er bundet sammen. Ved elektrolyse av vann blir vannmolekylene splittet i oksygenmolekyler og hydrogenmolekyler. Elektrolyse av vann kan utføres på to måter: a) ved vanlig atmosfærisk trykk, eller b) ved høyere trykk enn atmosfærisk.

En elektrolyse består i at to metallplater med ulik elektrisk ladning, elektroder, blir senket ned i en elektrolytt. Ved den negative elektroden, katoden, blir hydrogen produsert som gass. Ved anoden blir oksygen produsert. Elektrolysen skjer ved at elektroder utveksler ioner med elektrisk ladning som har med motsatt fortegn av elektroden. Dette skjer ved å bruke en elektrolytt og en elektrisk krets.

Et ion er et atom med færre eller flere elektroner enn protoner. Dersom ioner har et flertall av elektroner kaller vi det et anion, et ion med negativ elektrisk ladning. Dersom ioner har et mindretall av elektroner kaller vi det et kation, et ion med positiv elektrisk ladning.

En elektrolytt er en oppløsning som er i stand til å transportere eller lede ioner. I elektrolyse av vann vil elektrolytten bestå av en basisk løsning, kalium-hydroksid (KOH) oppløst i vann<sup>13</sup>. Oppløsningen omdanner kalium-hydroksid til OH<sup>-</sup> anioner og K<sup>+</sup> kationer<sup>14</sup>. I elektrolytten flyter ioner med negativt ladede ioner mot den positive elektroden mens positivt ladede ioner flyter mot den negative elektroden<sup>15</sup>.

Ved elektrodene vil ionene bli oksidert eller redusert. En oksidering innebærer at anionene som er negativt ladet gir fra seg elektroner. En reduksjon innebærer at de positivt ladede kationene konsumerer elektroner. Elektronene tilføres katoden fra en elektrisk krets som er tilkople

---

<sup>11</sup> ibid., side 11.

<sup>12</sup> Hentet fra [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/CUTE\\_Technology\\_Brochure.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf) og <http://en.wikipedia.org/wiki/Electrolysis>

<sup>13</sup> <http://no.wikipedia.org/wiki/Hydroksid>, OH<sup>-</sup> er et ion med et oksygenatom og et hydrogenatom. Det er et kompleksion siden det består av to atomer. Det kalles også "diatomic anion" siden det er negativt ladet. Dersom et proton tilføres hydroksid-ionet vil det dannes vann, OH<sup>-</sup> + H<sup>+</sup> → H<sub>2</sub>O

<sup>14</sup> <http://www.snl.no/kaliumhydroksid>

<sup>15</sup> <http://www.snl.no/elektrolyse>

elektrolysebadet. Ved anoden blir elektronene tilført den samme kretsen. Det er elektrisiteten som setter i gang oksidering og reduksjon ved elektrodene.

I en elektrolyse vil katoden være negativt ladet og anoden positivt ladet fordi prosessen konsumerer elektrisitet. I et batteri eller en brenselcelle vil det være omvendt siden prosessen produserer elektrisitet<sup>16</sup>. I en elektrolyse vil elektrodene tiltrekke seg ioner med motsatt elektrisk ladning enn hva elektroden har siden elektrisitet konsumeres. I et batteri eller en brenselcelle vil elektroder tiltrekke seg ioner med samme elektriske ladning som elektroden selv<sup>17</sup> siden elektrisitet produseres. En brenselcelle eller et batteri er derfor en omvendt prosess av en elektrolyse.

Det er elektrisk strøm og elektrolytten som setter i gang utvekslingen av ioner. Uten en elektrolytt vil positive hydrogenioner samle seg opp ved den positive elektroden og negative OH<sup>-</sup> ioner ved den negative elektroden. Dette skyldes at vann leder elektrisitet dårlig. Elektrodene i en elektrolyse av vann er laget av platinum eller rustfritt stål<sup>18</sup>.

Elektrolyse av vann kan utføres under vanlig atmosfærisk trykk eller ved å sette hydrogen under et trykk på 30 bar<sup>19</sup>. Den siste formen for elektrolyse krever en energiinnsats 4,8 kWh pr Nm<sup>3</sup> med en usikkerhetsmargin på 1 kWh. Energiforbruket stiger til 5,1 kWh/Nm<sup>3</sup> dersom transformator, likerettere og utstyr til rensing av gass tas med<sup>20</sup>. Den første formen krever en energiinnsats på 4,1 kWh pr Nm<sup>3</sup> med den samme usikkerhetsmarginen. Forbrenning av 1 Nm<sup>3</sup> med hydrogen gir 3 kWh<sup>21</sup>. Uten ytterligere tilførsel av energi vil virkningsgraden være 73% for elektrolyse under vanlig atmosfærisk trykk og 62,5% for elektrolyse som produserer hydrogen under trykk. Virkningsgraden er dermed definert som den mengde elektrisitet som overføres til hydrogen i form av netto kaloriverdi ("lower heating value"), den energi som utløses ved forbrenning av 1 Nm<sup>3</sup> hydrogen.

Figur 1 viser en oversikt over elektrolyse-prosessen.

Figur 1 Elektrolyse<sup>22</sup>

---

<sup>16</sup> <http://en.wikipedia.org/wiki/Cathode>

<sup>17</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Battery\\_%28electricity%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Battery_%28electricity%29), se How batteries work ("One half-cell includes electrolyte and the electrode to which anions (negatively-charged ions) migrate, i.e. the anode or negative electrode; the other half-cell includes electrolyte and the electrode to which cations (positively-charged ions) migrate, i.e. the cathode or positive electrode"), <http://en.wikipedia.org/wiki/Electrolysis>, se Process of electrolysis ("Each electrode attracts ions that are of the opposite charge").

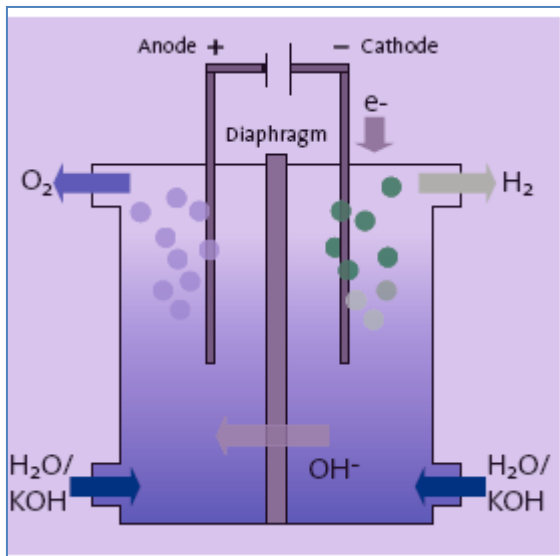
<sup>18</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Electrolysis\\_of\\_water](http://en.wikipedia.org/wiki/Electrolysis_of_water)

<sup>19</sup> [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/CUTE\\_Technology\\_Brochure.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf), side 14

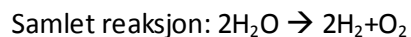
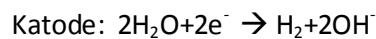
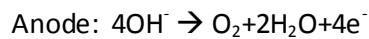
<sup>20</sup> [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/DETAILED\\_SCREEN.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/DETAILED_SCREEN.pdf), side 24. elektrisiteten til elektrolysen tas fra strømmettet som vekselstrøm og konverteres til likestrøm med transformatorer og likerettere, se side 22.

<sup>21</sup> [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/CUTE\\_Technology\\_Brochure.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf), side 45.

<sup>22</sup> [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/DETAILED\\_SCREEN.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/DETAILED_SCREEN.pdf), side 21



Proessen i en elektrolyse kan sammenfattes i reaksjonslikninger slik <sup>23</sup>:



### Damp-reformering

Naturgass inneholder hydrokarboner som er en kjemisk sammensetning av hydrogen og karbon. Naturgass inneholder metan som er den enkleste form for hydrokarboner <sup>24</sup>. Damp-reformering går ut på å skille hydrogen og karbon i metan fra hverandre ved å la metan reagere med en katalysator laget av nikkell under høy temperatur, omlag 900° C. Varmen som trengs for reaksjonen produseres ved å forbrenne naturgass. Hydrogen blir produsert i form av damp <sup>25</sup>. Tidligere ble damp-reformering brukt i store anlegg med kapasitet opptil 100 000 Nm<sup>3</sup> hydrogen per time. I forbindelse med CUTE-prosjektet ble det brukt mindre anlegg med en kapasitet opptil 20 Nm<sup>3</sup> hydrogen per time. Slike anlegg er bedre egnet til å produsere hydrogen for mindre buss-flåter. Dessuten vil små lokale anlegg redusere transportbehovet av hydrogen i energikrevende, flytende form.

Proessen foregår i to trinn i en prosess-ovn <sup>26</sup>. I første steg blir vann tilført prosess-ovnen sammen med naturgass. Mineraler blir fjernet fra vannet ved hjelp av ion-utveksling. Svovel blir fjernet fra hydrokarboner før det blir tilført prosess-ovnen. Dersom hydrokarbonene er varmet opp på forhånd blir de blandet med vanndamp, ellers blandes de med vann. Selve reformeringen kan enten skje under trykk på omlag 16 bar med integrerte varmevekslere eller under lavt trykk (1,5 bar). Dersom siste løsning blir valgt må hydrogenet komprimeres før det renses.

<sup>23</sup> ibid., side 14, e<sup>-</sup> står for elektroner, OH<sup>-</sup> er hydroksid-ioner.

<sup>24</sup> <http://no.wikipedia.org/wiki/Metan>

<sup>25</sup> [http://www.fuel-cell-bus-](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf)

[club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/CUTE\\_Technology\\_Brochure.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf), side 21

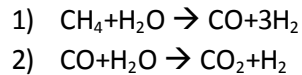
<sup>26</sup> ibid., side 20



Under høy temperatur i prosess-ovnen foregår damp-reformeringen ved hjelp av en nikkel-katalysator. Reformeringen skiller hydrogen- og karbonatomer fra hverandre og produserer en damp med hydrogen samt karbonmonoksid.

I det andre steget blir vanddampen fra steg 1 sammen med karbonmonoksid ført inn i en reaktor. Hydrogen- og oksygenatomene i vanddampen blir skilt fra hverandre. Oksygenet forbinder seg med karbonmonoksid til karbondioksid mens hydrogenet blir ført sammen med hydrogenet fra steg 1.

Vi har to reaksjoner i to steg:



I begge stegene i prosessen blir det produsert hydrogen. Prosessen i det første steget konsumerer varme og kalles en endotermisk prosess. Prosessen i det andre steget produserer varme og kalles eksotermisk<sup>27</sup>. Dersom metan brukes som basis for hydrokarboner blir det produsert 5,5 ganger så mye CO<sub>2</sub> som hydrogen<sup>28</sup>.

Etter de to stegene i prosessen må hydrogenet renses før det kan brukes i en brenselcelle. Gassen som blir til overs etter rensingen kan brukes som input i prosess-ovnen. Under normale betingelser er denne overskudds-gassen nok til å drive prosess-ovnen slik at systemet er selv-opprettende<sup>29</sup>.

Dersom prosess-ovnene for damp-reformering er små kan de potensielt monteres på kjøretøy som bruker hydrogen som input til brensel-celler. Dette har vært foreslått som løsningen på problem med lagring og distribusjon av hydrogen. I dette tilfelle vil metanol være input til prosessen og naturgass eller metan må omformes til metanol. Metanol har den fordel at den er flytende og lar seg lettere transportere enn metan. Med en montert prosess-ovn for damp-reformering på kjøretøyet kan metanol og vanddamp omgjøres til hydrogen etter behov og tilføres brenselcella som lager strøm til den elektriske motoren. Dermed slipper man fylling av hydrogen og etablering av et nytt distribusjonssystem for et nytt drivstoff.

På den annen side medfører reformering av damp utslipp av CO<sub>2</sub>. En slik løsning vil derfor ikke eliminere CO<sub>2</sub>-utslipp ved bruk av brensel-celle.

Et annet alternativ er reformering av damp i sentrale anlegg og transport til fylling-stasjoner<sup>30</sup>. I sentrale anlegg kan det være mulig å få til CO<sub>2</sub>-håndtering ved reformering av damp. Ulempen med denne løsningen er at hydrogenet må transporteres fra det sentrale anlegget. Transport av hydrogen vil være lettest med flytende hydrogen. Omdanning av hydrogen fra gass til flytende form krever energi og transport av flytende hydrogen vil også medføre CO<sub>2</sub>-utslipp.

---

<sup>27</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Fossil\\_fuel\\_reforming](http://en.wikipedia.org/wiki/Fossil_fuel_reforming)

<sup>28</sup> ibid.

<sup>29</sup> [http://www.fuel-cell-bus-](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf)

[club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/CUTE\\_Technology\\_Brochure.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf), side 22

<sup>30</sup> Se [http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen\\_energibaerer.pdf](http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen_energibaerer.pdf), side 44.

## Hydrogen og motorteknologi

Hydrogen kan brukes som drivstoff i kjøretøy på to måter. Enten som drivstoff for brenselceller sammen med en elektrisk motor eller som drivstoff i vanlige forbrenningsmotorer<sup>31</sup>. I begge tilfelle blir utslipp av CO<sub>2</sub> erstattet av utslipp av vandamp. Forbrenningsmotoren vil imidlertid gi utslipp av NO<sub>x</sub> siden luft som forbrukes ved forbrenning hentes fra utemiljøet. Denne luften vil inneholde nitrogen som forbinder seg med oksygen under forbrenningen ved høy temperatur. Dermed dannes NO<sub>x</sub>, nitrogen-oksid. Ved vanlige temperaturer vil nitrogen og oksygen ikke inngå forbindelser med hverandre.

### Hydrogen i forbrenningsmotor

Hydrogen kan brukes som erstatning for diesel eller bensin i en vanlig forbrenningsmotor. BMW H2R bruker flytende hydrogen i en slik prosess<sup>32</sup>. Om hydrogen blandes sammen med oksygen vil blandingen varmes opp ved tilførsel av tenning eller gnist. Hydrogen og oksygen blandes sammen ved at to hydrogen-atomer binder seg til ett oksygen-atom. Gass som varmes opp utvider seg og eksploderer. Dette vil drive stempler i sylindrene i en vanlig forbrenningsmotor akkurat som en blanding av diesel og oksygen vil gjøre. Oksygen tas fra luften akkurat som i en vanlig forbrenningsmotor<sup>33</sup>. Eksosen fra en slik forbrenning vil inneholde vann, akkurat som eksosen fra en brenselcelle.

Eksplasjon av hydrogen og oksygen vil danne temperaturer opp mot 2200° C. I en forbrenningsmotor med diesel vil forbrenningen danne temperaturer opp mot 700°C mot 750-800°C i en bensinmotor<sup>34</sup>. Dette skyldes at hydrogen inneholder mer energi pr vektenhet enn diesel og bensin. Generering av høyere temperaturer medfører at hydrogen-drevne forbrenningsmotorer vil være mer effektive enn tilsvarende motorer som går på bensin eller diesel. De høyere temperaturene medfører også større utslipp av NO<sub>x</sub> ved at hydrogen binder seg til nitrogen fra lufta som tas inn<sup>35</sup>.

Dersom hydrogen brukes i en vanlig forbrenningsmotor må kjøretøyet modifiseres. For det første må kjøretøyet ha tanker for lagring av hydrogen. Videre må kompresjons-forholdet mellom luft og gass være høyere, lufttilførselen må økes, oljen må separeres for å hindre hydrogen i å blandes med olje, en spesiell olje må benyttes og sylindrene må være variable for å øke effektiviteten av forbrenningen<sup>36</sup>.

BMW har utviklet en modell, Hydrogen 7, som bruker hydrogen i en forbrenningsmotor<sup>37</sup>. Bilen kan gå på både bensin og hydrogen, den kan faktisk skifte mellom bensin og hydrogen under fart. Bilen veier omlag 250 kg mer enn en vanlig bil fra BMW 7-serien som bilen er bygd på. Det skyldes blant annet en ekstra tank for flytende hydrogen og varmevekslere for å omdanne flytende hydrogen til

<sup>31</sup> Disse kjøretøyene kalles Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicle, HICEV. Se

[http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen\\_internal\\_combustion\\_engine\\_vehicle](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_internal_combustion_engine_vehicle)

<sup>32</sup> <http://auto.howstuffworks.com/bmw-h2r2.htm>

<sup>33</sup> <http://www.physlink.com/Education/askExperts/ae575.cfm> Et godt spørsmål er hvorfor ikke vann eksploderer ved oppvarming siden det består av to hydrogen-atomer bundet sammen med ett oksygen-atom. En forklaring er at vann er *resultatet* av en slik binding, ikke *forstadiet* til bindingen. Hydrogen uten binding til oksygen er i en ustabil tilstand, i vann derimot er hydrogen i en stabil tilstand siden det allerede er bundet til oksygen.

<sup>34</sup> [http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen\\_energibaerer.pdf](http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen_energibaerer.pdf), side 22.

<sup>35</sup> *ibid.*, side 22

<sup>36</sup> <http://www.mwcog.org/uploads/committee-documents/v1ldW1s20060524145809.ppt>

<sup>37</sup> <http://www.wired.com/cars/energy/news/2006/11/72100>

gass som kan brukes i en forbrenningsmotor. Tanken for flytende hydrogen består av rustfritt stål med dobbel-vegg med en aluminiumsfolie. Den ekstra vekten og materialforbruket innebærer mer energiforbruk og utslipp av CO<sub>2</sub> ved konstruksjon av bilen. I tillegg krever omdanning av hydrogen til flytende form omlag en tredjedel av energiinnholdet i hydrogen<sup>38</sup>. Det oppgis at en BMW Hydrogen 7 har CO<sub>2</sub>-utslipp som tilsvarer 1% av maksimum tillatt nivå i USA og EU, mens NO<sub>x</sub> utslipp er 30% av maksimum nivå i USA og 2% av samme nivå i Europa.

## Brenselcelle

En brenselcelle er en elektrokjemisk prosess som konverterer hydrogen til elektrisitet. Elektrolyse er også en elektrokjemisk prosess. En brenselcelle opererer som en omvendt elektrolyse. I en elektrolyse *skilles* ulike komponenter fra hverandre, f.eks. blir hydrogen og oksygen utskilt fra vann som er en kjemisk reaksjon av begge stoffer. I en brenselcelle vil ulike komponenter *reagere* med hverandre, ren hydrogen vil forbinde seg med tilført oksygen og danne vann. Prosessen produserer elektrisitet som blir tilført kjøretøyets elektriske motor.

Oksygenet som tilføres hentes fra luft gjennom kjøretøyets luftinntak. Luften blir komprimert før den sendes inn i brenselcellene<sup>39</sup> ved hjelp av en luft-kompressor. Inntaket av luft øker proporsjonalt med uttak av strøm fra brenselcellene.

En brenselcelle er basert på utveksling av protoner gjennom en membran<sup>40</sup>. Membran fungerer som en elektrolytt gjør i en elektrolyse-celle. En membran er et lag av materialer som skiller andre materialer eller prosesser fra hverandre<sup>41</sup>. Den er laget for å hindre spesielle partikler eller molekyler å trenge gjennom membranen.

Membran i en proton-utvekslende brensel-celle er laget av polymer<sup>42</sup> som er en lang kjede av molekyler som er satt sammen av repeterende enheter som kalles monomer. En polymer dannes ved at monomer inngår kjemiske bindinger, de deler elektroner med hverandre.

Denne membranen tillater positivt ladede ioner å passere gjennom den. Elektroner vil passere gjennom kretsen til katode-siden av brenselcella siden membranen er elektrisk isolerende<sup>43</sup>. Ved passeringen av elektroner gjennom den elektriske kretsen produseres elektrisitet til den elektriske motoren på kjøretøyet som har brenselcellene montert.

En brenselcelle består av to elektroder med ulik elektrisk ladning, akkurat som en elektrolysecelle. Katoden er positivt ladet<sup>44</sup> mens anoden er negativt ladet. Hver elektrode har en katalysator som er laget av platinum. Ved anoden foregår det en oksidasjon, hydrogen-atomet mister elektroner og omdannes til et positivt ladet ion, H<sup>+</sup>. Denne reduksjonen foregår med platinum som katalysator.

---

<sup>38</sup> [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/CUTE\\_Technology\\_Brochure.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf), side 26

<sup>39</sup> [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/CUTE\\_Technology\\_Brochure.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf), side 36

<sup>40</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Proton\\_exchange\\_membrane\\_fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Proton_exchange_membrane_fuel_cell)

<sup>41</sup> <http://en.wikipedia.org/wiki/Membrane>

<sup>42</sup> <http://en.wikipedia.org/wiki/Polymer>

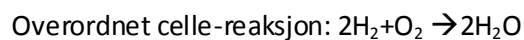
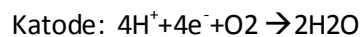
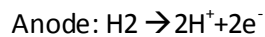
<sup>43</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell)

<sup>44</sup> I en elektrolyse er det omvendt, her er katoden negativt ladet siden elektrisitet konsumeres og ikke produseres, se <http://en.wikipedia.org/wiki/Cathode>

Elektronene blir gitt til en elektrisk krets som forbinder elektrodene. H<sup>+</sup> ionene transporteres gjennom membranen til katoden.

Molekyler med et underskudd av elektroner<sup>45</sup> kalles kationer og blir ført gjennom membranen til katoden. Siden de har et underskudd av elektroner er de positivt ladet. Ved katoden forgår det en reduksjon av oksygen<sup>46</sup> ved at elektroner tilføres oksygenet fra den elektriske kretsen. Det dannes OH<sup>-</sup> ioner som reagerer med H<sup>+</sup> ionene fra anoden. Resultatet av denne reaksjonen er vann<sup>47</sup> som transporteres ut av brensel-cellen.

Prosessen kan sammenfattes i følgende representasjoner<sup>48</sup>:



Figur 2 oppsummerer prosessen. I en elektrolyse av vann er vannet *input* til prosessen. I en brenselcelle er vannet *output* av prosessen. I en elektrolyse blir vannet *splittet* i hydrogen og oksygen, i en brenselcelle *reagerer* hydrogen og oksygen til vann. En forbrenningsmotor produserer termisk energi. En brenselcelle produserer elektrisk energi. I en elektrolyse må elektrisitet *tilføres* utenfra. I en brenselcelle blir elektrisitet *produsert* til en ekstern elektrisk motor. En brenselcelle kan ikke lagre energi, den må brukes når den produseres. Et batteri derimot, kan lagre energi.

Figur 2 Proton-exchange-membrane brenselcelle<sup>49</sup>.

---

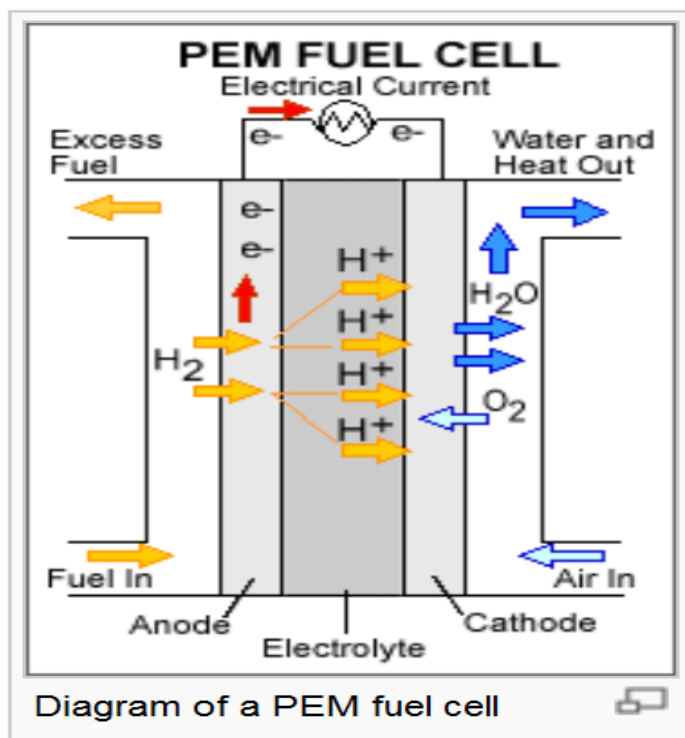
<sup>45</sup> Siden elektronene er de bevegelige delene av molekyler og atomer (protonene er innelåst i atom-kjernen) er det riktigere å snakke om underskudd og overskudd av elektroner enn tilsvarende for protoner.

<sup>46</sup> Se <http://www.snl.no/brenselcelle>

<sup>47</sup> [http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv\\_pem.shtml](http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv_pem.shtml), se også [http://www.fctec.com/fctec\\_basics.asp](http://www.fctec.com/fctec_basics.asp)

<sup>48</sup> [http://www.fctec.com/fctec\\_basics.asp](http://www.fctec.com/fctec_basics.asp)

<sup>49</sup> Fra [http://en.wikipedia.org/wiki/Proton\\_exchange\\_membrane\\_fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Proton_exchange_membrane_fuel_cell)



En brenselcelle er ikke nok til å forsyne den elektriske motoren i kjøretøyet med strøm. Derfor settes brenselceller sammen i en "stack", en stabel med brenselceller. Disse kan seriekoples eller parallellkoples. De seriekoblede gir mer spenning mens de parallellkoblede gir mer strøm<sup>50</sup>. Bussene som ble anvendt i CUTE-prosjektet hadde to "stacks" med til sammen 1 920 brenselceller. Equinox er en hydrogenbil utviklet av Chevrolet med omlag 400 brenselceller<sup>51</sup>.

En typisk stack med brenselceller inneholder 20-30 g platinum og yter 100 kW<sup>52</sup>. Dette gir fra 0,2 til 0,3 g platinum pr kW. En ytelse på 100 kW svarer til omlag 134 hestekrefter. Platinum krever mye energi i produksjon. I følge den tyske databasen ProBas<sup>53</sup> utviklet av det tyske miljøverndepartementet er energibruket hele 8,01 GJ/kg platinum. Produksjon av 1 kg platinum fører til utslipp av 523 kg CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. Dette omfatter energibruk og utslipp i hele produksjonskjeden. Siden det brukes beskjedne mengder med platinum pr kW blir likevel energibruken og CO<sub>2</sub>-utslipp beskjedne for produksjon av platinum som inngår i en brenselcelle-stack. Med 100 kW er energibruken for produksjon av platinumet omlag 200 MJ eller 55,5 kWh. Utslipp av CO<sub>2</sub>-ekvivalenter forventes å være i størrelsesorden 13 kg.

Ved forbrenning av fossilt brensel dannes energi ved at gass forbrennes. I et kullkraftverk brukes gass som er oppvarmet ved forbrenning til å varme opp vann slik at dampen fra vannet kan drive en turbin. I en forbrenningsmotor varmes gass og utvides i en mekanisk innretning slik som en sylinder. Utvidelsen produserer energi. En brenselcelle generer elektrisitet direkte fra brenselcellen uten å

<sup>50</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell)

<sup>51</sup> <http://alternativefuels.about.com/od/fuelcellvehiclereviews/fr/equinoxfuelcell.htm>

<sup>52</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Fossil\\_fuel\\_reforming](http://en.wikipedia.org/wiki/Fossil_fuel_reforming)

<sup>53</sup> <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/profisuuche.php?&prozessid={0E0B2A9C-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49}&id=1&step=4&op={0E0B244B-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49}&nace=-1&loc=&ref=&org=&prid=&pageid=1>

varme opp gass. Derfor er en brenselcelle mer effektiv i produksjon av energi siden den ikke trenger å gå omveien om oppvarming av gass under trykk<sup>54</sup>.

### Drivverk for brenselcelle

Bussene som deltar i CUTE-prosjektet (Clean Urban Transport Europa) er en spesiallaget utgave av Mercedes Benz Citaro. Den veier 18 tonn og har 30 passasjer-seter. Bussen har et drivverk tilpasset en brenselcelle-motor med hydrogen som drivstoff. Bussene har hydrogentanker montert på taket. Disse tankene inneholder hydrogen i gassform under et trykk på 350 bar. Til sammen veier drivverket for brenselcelle-motoren tre tonn ekstra. Bussenes fjæringsystem har blitt forsterket med henblikk på den økte vekten og på kjøretøyets tendens til å rulle på grunn av hydrogentankene på taket.

Komfortvarme er avhengig av at brenselcellene er i bruk. Ekstra rørsystem er nødvendig for å føre varmen fra brenselcellene montert på taket til bussenes varmeanlegg. Alt i alt medfører ekstra vekt for hydrogen-bussen at det kreves mer materialer, energi og CO<sub>2</sub>-utslipp for å lage den.

Chevrolet Equinox er en elektrisk bil utviklet av Chevrolet<sup>55</sup> for brensel-celle med hydrogen som drivstoff. Bilen har tre drivstoff-tanker med hydrogen komprimert til 700 bar. Til sammen kan de tre tankene lagre 4,2 kg hydrogen. Målt med bensin-ekvivalenter tilsvarer 1 kg hydrogen omlag 3,8 liter bensin (en amerikansk gallon). Den har en elektrisk motor med en kapasitet på 93 kW som tilsvarer. Motoren lader også bilens batteri. Bilen er omlag 230 kg dyrere enn en vanlig Chevrolet Equinox. For å redusere vekten er dørene laget av aluminium og panseret er laget av karbonfiber<sup>56</sup>.

### Transport av hydrogen

Hydrogen fra sentrale produksjonsanlegg må transporteres i flytende form til fyllingsstasjoner på grunn av hydrogenets lave energitetthet (f eks målt ved kWh/Nm<sup>3</sup>). En lastebil kan frakte 3,3 tonn<sup>57</sup> med flytende hydrogen. Dette svarer til 36, 700 Nm<sup>3</sup>. Lastebiler som frakter flytende hydrogen må ha spesielt isolerte tanker på grunn av den lave temperaturen hydrogenet fraktes med.

Det kreves mye energi for å omdanne hydrogen fra gass til flytende form. En kubikkmeter med hydrogen har en brutto kaloriverdi på 3,54 kWh/Nm<sup>3</sup> ("upper heating value"). Det kreves 1 kWh for å gjøre om 1 Nm<sup>3</sup> med hydrogen til flytende form. Følgelig brukes nesten en tredjedel av energiinnholdet i hydrogen til å omdanne til det til flytende form<sup>58</sup>.

### Fylling og interne tap

Brenselcelle produserer varme. Noe av varmen blir benyttet til komfortvarme, resten blir slippet ut i atmosfæren via varmeveksler. Når brenselcellen er i funksjon vil hydrogen flyte fra anoden i brenselcellen. På grunn av kondensering må hydrogengassen renses med jamne mellomrom. Dette innebærer at noe hydrogen vil bli sluppet ut i atmosfæren uten å bli nyttiggjort. Det oppstår eksplosjonsfare om mengden hydrogen i luft overstiger 4%. Under ingen omstendighet vil mengden

---

<sup>54</sup> [http://www.fctec.com/fctec\\_basics.asp](http://www.fctec.com/fctec_basics.asp)

<sup>55</sup> <http://alternativefuels.about.com/od/fuelcellvehiclereviews/fr/equinoxfuelcell.htm>

<sup>56</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Chevrolet\\_Equinox](http://en.wikipedia.org/wiki/Chevrolet_Equinox), se Fuel cell.

<sup>57</sup> [http://www.fuel-cell-bus-](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf)

[club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/CUTE\\_Technology\\_Brochure.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf), side 26.

<sup>58</sup> ibid.

av hydrogen som slippes ut medføre konsentrasjoner mer enn 35% av den nedre grenseverdi på 4%<sup>59</sup>.

I en brenselcelle vil spenningen minke etter hvert som produksjon av strøm øker. Dette skyldes et fenomen som kalles over-potensial, reduksjon og oksidering av ioner i brenselcellen krever mer energi enn det som forventes ut fra termodynamiske forhold<sup>60</sup>. På katodesiden i en brenselcelle vil oksygenet gjennomgå en reduksjon mens hydrogenet oksideres. Denne reduksjonen er ansvarlig for det største overpotensial, og dermed effektivitetstap, i en brenselcelle<sup>61</sup>. Derfor må flere mindre brenselceller kobles sammen i en stabel eller stack snarere enn å anvende en stor brenselcelle. Tap av spenning må karakteriseres som et interntap i brenselcellen som et energisystem.

Både varmetap og hydrogentap innebærer intern tapsenergi i den direkte energien som produseres av en brenselcelle, den energien som kreves til framdrift av kjøretøyet<sup>62</sup>. Interntap kan også oppstå ved lufttilførsel<sup>63</sup>. Luften som tilføres en brenselcelle må tørkes og settes under trykk. Dette krever tilførsel av energi som reduserer energi-effektiviteten til brenselcellen.

Fylling av hydrogen-busser ble foretatt på to måter i CUTE-prosjektet, overflow-fylling og booster-fylling. Kravet til fylling var at prosessen ikke skal ta mer enn 30 minutter pr buss. Det skal også være mulig å fylle tre busser uten avbryting. Disse kravene er ikke fullt ut oppfylt, blant annet på grunn av ned-dimensjonering av fylle-stasjonen på grunn av bebyggelse eller andre industrielle bygninger i nærheten av den. Dette fører til at intervallet mellom to fyllinger øker siden mengden av hydrogen som kan lagres minker<sup>64</sup>.

Overflow-fylling innebærer at trykket på hydrogenet på fylling-stasjonens lagringstank er *høyere* enn trykket på hydrogenet i bussens tank etter fylling. Hydrogenets trykk utjamnes på vei til tanken. Dette gjøres ved å dele lagringstanken inn i flere deler hvor trykket reduseres fortløpende. Det er kun den siste delen som skal koples til kjøretøyets tank. Denne delen krever økning av trykket før gassen slippes inn i kjøretøyets tank. En kompressor er bare nødvendig for å holde trykket oppe i lagringstankene på fylling-stasjonen.

Booster-fylling innebærer at trykket på hydrogen i fylling-stasjonens lagringstank er *mindre* enn trykket i tanken etter fylling. Derfor må trykket økes før hydrogenet fylles på bussens tank. For å øke trykket brukes en kompressor.

Ved fylling av flytende hydrogen må væsken omformes til gass før fylling. Etter omforming brukes overflow-fylling.

Det finnes også kombinasjoner av de ulike formene for hydrogen-fylling. Det foreligger ingen dokumentasjon i CUTE-prosjektet på hvor mye energi som kreves for å drive kompressorer ved fylling-stasjonen. Kapasiteten til kompressorene som benyttes avhenger av metoden for fylling. En

---

<sup>59</sup> *ibid.*, side 32.

<sup>60</sup> <http://en.wikipedia.org/wiki/Overpotential>

<sup>61</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Electrolysis\\_of\\_water](http://en.wikipedia.org/wiki/Electrolysis_of_water), se under Efficiency

<sup>62</sup> Se Høyer, K.G.: *Høyhastighetstog. Analyser av direkte og brutto direkte energiforbruk*. TDM-rapport 1/09, side 21.

<sup>63</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell), se avsnitt "In practice".

<sup>64</sup> [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/CUTE\\_Technology\\_Brochure.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf), side 10

overflow-stasjon har en kompressor på omlag 60 NM<sup>3</sup> per time. En booster-stasjon har en kompressor med en kapasitet fra 100 til 2 400 NM<sup>3</sup> pr time. En kombinasjon av de to fyllingstypene har en kompressor-kapasitet fra 100 til 5 380 NM<sup>3</sup> per time. De fleste kombinasjons-stasjonene har en kompressor på 300 NM<sup>3</sup> pr time.

Fylling av en buss i CUTE-prosjektet tar om lag 15 minutter (maksimum 30 minutter).

GM har regnet ut at dersom USA bygger 12 000 fylling-stasjoner for hydrogen vil 70% av befolkningen ha en fylling-stasjon innenfor en radius på omlag 3,2 km samt en fylling-stasjon for hver 40 km på amerikanske motorveier som går mellom de 100 største byene<sup>65</sup>. En fylling-stasjon koster omlag 2 millioner dollar å bygge i 2008-priser. Med en prisnedgang etter hvert som flere fylling-stasjoner blir bygd vil den forventede prisen ligge på 1,5 millioner dollar pr fylling-stasjon. Dette betyr at vil koste omlag 18 000 millioner dollar å bygge ut et tilfredsstillende distribusjonsnett for hydrogen.

### **Energiinnhold i hydrogen kontra diesel**

Hydrogen i gassform har en tetthet på 0,09 kg/Nm<sup>3</sup><sup>66</sup>, det vil si 90 gram pr kubikkmeter hydrogen. Det innebærer at 1 kg med hydrogen tilsvarer 11,11 kubikkmeter hydrogen. Energiinnholdet for hydrogen er 3 kWh/NM<sup>3</sup>. Dette er lavere kaloriverdi ("lower heating value") for hydrogen, den mengde energi som blir frigjort ved forbrenning av en kubikkmeter av hydrogen. Dermed vil at forbrenning av 1 kg med hydrogen utløser 3X11,11Nm<sup>3</sup>=33,33 kWh som igjen svarer til 120 MJ.

Diesel har en lavere kaloriverdi på 43 MJ/kg<sup>67</sup>. Forbrenning av 1 kg med hydrogen vil dermed utløse 120/43=2,8 ganger med MJ enn forbrenning av 1 kg diesel.

### **E energibruk til framdrift for hydrogen-kjøretøy**

I denne delen skal vi se på tank-to-wheel energibruk med hydrogen som drivstoff. Dette omfatter energien som brukes til framdrift av transportmidlene.

Bussene i CUTE-prosjektet har ni tanker for lagring av hydrogen med en samlet lagringskapasitet på 44 kg. De 1 920 brensel-celleene var satt sammen i stacker i to moduler med en ytelse på til sammen 250 kW eller 335 hestekrefter<sup>68</sup>.

Tabell 1 viser kjørelengde, timer i drift, forbruk og km/time pr by i CUTE-prosjektet<sup>69</sup>. Det var tre busser pr by i prosjektet.

I gjennomsnitt brukte en buss i gjennomsnitt 0,248 kg med hydrogen eller 8,27 kWh (29,8 MJ) pr km. Energimengden svarer til 0,581 liter diesel pr km<sup>70</sup> eller 5,81 liter pr mil. Gjennomsnittfarten pr buss pr by var 13,6 km pr time, kjørelengden var i gjennomsnitt nesten 32 000 km pr buss pr by. Tabell 1

---

<sup>65</sup> <http://hydrogendiscoveries.wordpress.com/2008/04/09/hydrogen-manhattan-project/>

<sup>66</sup> [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/CUTE\\_Technology\\_Brochure.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf) side 45

<sup>67</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Lower\\_heating\\_value](http://en.wikipedia.org/wiki/Lower_heating_value)

<sup>68</sup> [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/DETAILED\\_SCREEN.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/DETAILED_SCREEN.pdf), side 9

<sup>69</sup> ibid, figur 3.3.7, figur 3.3.8 og figur 3.3.9 side 67, og figur 3.3.10 side 68.

<sup>70</sup> 1 kg hydrogen tilsvarer 2,79 kg diesel som har en tetthet på 0,84 kg/liter, se ibid., side 10 og [http://www.ssb.no/emner/01/03/10/rapp\\_200849/rapp\\_200849.pdf](http://www.ssb.no/emner/01/03/10/rapp_200849/rapp_200849.pdf) side 15.



viser likevel at kjørelengde varierte mye mellom byene. Hver buss var i gjennomsnitt i drift i 2 387 timer.

Bussene ble testet under forskjellige temperatur-forhold og i ruter med forskjellig topografi. Tabell 1 viser derfor resultatene av en test under realistiske kjøreforhold, tabellen viser ikke resultat fra et laboratorium eller fra teoretiske modellberegninger.

Tabell 1 Kjørelengde og forbruk pr by i CUTE-prosjektet

	Kg pr km (A)	Tilbakelagt e km (B)	kWh pr km <sup>71</sup> (B)	kWh totalt	Timer i drift (C)	km/time (E)	MJ pr km (F) <sup>72</sup>
Barcelona	0,274	37 655	9,13	343 881	3 339	12,9	32,9
Porto	0,315	47 270	10,50	496 285	5 228	8,9	37,8
Madrid	0,288	103 445	9,60	992 973	8 859	13,8	34,6
Stockholm	0,266	91 585	8,87	811 972	8 819	9,7	31,9
London	0,239	98 253	7,97	782 671	7 952	13,9	28,7
Hamburg	0,204	104 727	6,80	712 072	6 824	16,2	24,5
Amsterdam	0,216	109 100	7,20	785 441	5 614	18,1	25,9
Stuttgart	0,221	129 288	7,37	952 326	8 545	11,4	26,5
Luxembourg	0,209	142 068	6,97	989 641	9 273	17,9	25,1
Gjennomsnitt	0,248		8,27			13,6	29,8
Sum		863 391		6 867 264	64 453		

Figur 3 viser sammenhengen mellom energiforbruk i kWh pr km og antall km bussene var i drift. Figuren viser gjennomsnittlig forbruk pr by mot samlet kjørelengde pr by. Figuren viser en klar tendens, jo mer bussene var i drift, jo lavere var energiforbruket pr km. Byer med svarte punkter er byer med lokale elektrolyseanlegg for produksjon av hydrogen, de gule punktene er byer med ekstern tilførsel av hydrogen og de grå punktene er byer med lokale anlegg for produksjon av hydrogen fra gassreforming.

Figuren viser den estimerte sammenhengen<sup>73</sup> i form av en regresjonslinje basert på en modell med en invers tilpasning mellom kjørelengde og forbruk. Modellen er en asymptotisk modell hvor det antas at forbruket synker med økende kjørelengde men hvor forbruket når en nedre grenseverdi som ikke passeres.

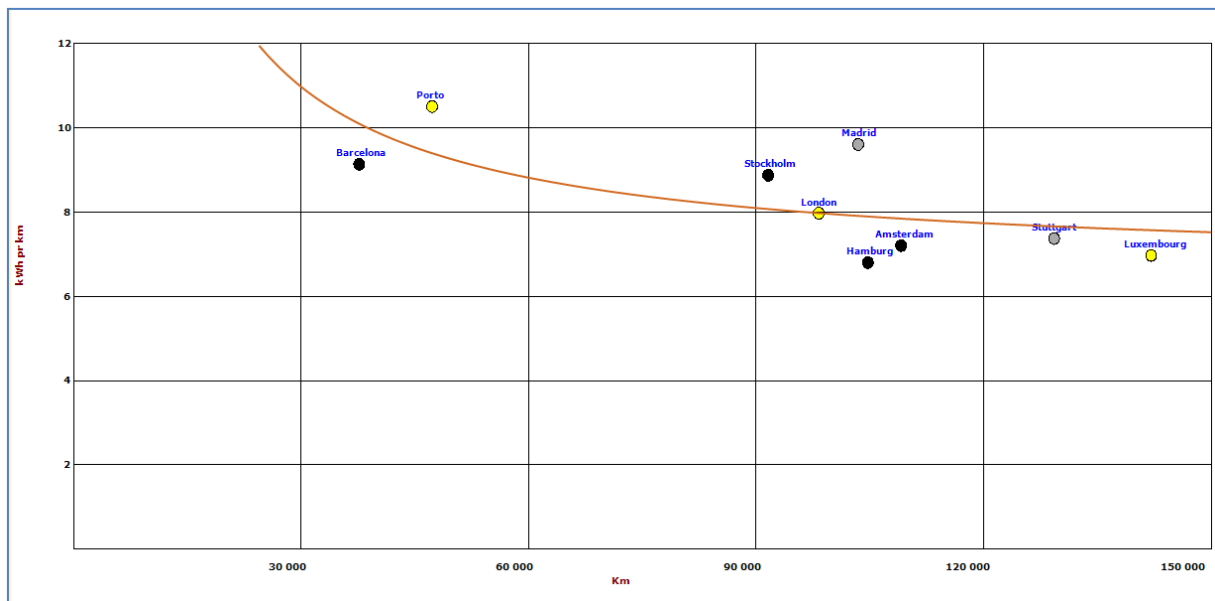
I følge modellen vil en kjørelengde på 50 000 km vil gi et estimert forbruk på 9 kWh (32,4 MJ) pr km med ± 6% usikkerhet mens en kjørelengde på 100 000 km vil gi 8 kWh pr km (28,8 MJ) med en usikkerhet på ± 5%. Målet med gjennomsnittselastisiteter forventer vi en nedgang på 0,92% for hver 10% økning i kjørelengde.

<sup>71</sup> Omregnet til kWh ved å bruke "lower heating value" for hydrogen på 33,33 kWh/kg, se [www.h2data.de](http://www.h2data.de) og [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/DETAILED\\_SCREEN.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/DETAILED_SCREEN.pdf)  
side 11

<sup>72</sup> Omregnet til MJ ved å bruke 3,6 MJ pr kWh.

<sup>73</sup> Beregning av regresjonsmodellen gir  $\hat{Y} = 26,2 + (170476,99 * X^{-1})$  hvor  $X = \text{kjørelengde}$  og  $\hat{Y}$  er estimert punkt på regresjonslinjen for verdien  $X$ ,  $\hat{Y}$  er kWh/10 km for dette punktet.

Figur 3 Sammenheng mellom energiforbruk pr 100 km og antall km i drift for CUTE-prosjektet <sup>74</sup>



Chevrolet Equinox <sup>75</sup> er en brenselcelle-bil med en ytelse på 93 kW eller omlag 125 hestekrefter. Bilen har en rekkevidde på 150 miles eller 241,5 km. Bilen har tre tanker som kan lagre til sammen 4,2 kg hydrogen komprimert hydrogen med 700 bar trykk. Dette gir 165,5 kWh for hele rekkevidden som igjen gir 0,685 kWh eller 2,47 MJ per km. Dette er under tiendedelen av forbruket for bussene i CUTE-prosjektet pr km. Dette er imidlertid kun en omregning, ikke noe resultat fra test under forskjellige kjøreforhold. Omregnet i diesel-ekvivalenter bruker Chevrolet Equinox omlag 0,58 liter pr mil.

En amerikansk studie <sup>76</sup> refererer til testing av en Dodge RAM Wagon Van på en blanding av CNG ("compressed natural gas") og hydrogen. Bilen var bygd for å kjøre på CNG. Studien viser at dersom CNG blandes med hydrogen vil utslipp av CO<sub>2</sub> reduseres med 11,3%. Testen ble foretatt i et laboratorium med omlag 35 km/t som gjennomsnittsfart. Testen omfattet både kaldstart og varmstart av kjøretøyet. Til tross for reduksjonen var utslippet av CO<sub>2</sub> ved bruk av 15% hydrogen fremdeles 501,5 g CO<sub>2</sub> pr amerikansk mile, noe som svarer til 311 gram CO<sub>2</sub> pr kilometer. Utslipp av NO<sub>x</sub> økte med over 92% med bruk av hydrogen som tilsetningsdrivstoff, dette skyldes at kjøretøyet var optimalisert for å kjøre på CNG.

Dodge-modellen kjørte 835 miles med et forbruk på 141,5 kg med blandet drivstoff (15% hydrogen). Dette svarer til 14,7 mile pr gge ("gasoline gallon equivalents"). Dermed blir forbruket målt i gallon 56,8 for total kjørelengde. En amerikansk gallon er 3,8 liter og en mile er 1,61 km. Dermed brukte kjøretøyet 215,8 l bensin på 1344 km, noe som tilsvarer 1,6 liter bensin pr mil, når drivstoffet i gassform gjøres om til bensin liter-ekvivalenter. Bensin har et energiinnhold på 32 MJ/liter <sup>77</sup>,

<sup>74</sup> [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/DETAILED\\_SCREEN.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/DETAILED_SCREEN.pdf), side 67

<sup>75</sup> <http://alternativefuels.about.com/od/fuelcellvehiclereviews/fr/equinoxfuelcell.htm>. Se også <http://www.wired.com/autopia/2008/03/we-drive-the-ch/>

<sup>76</sup> U.S. Department of Energy. FreedomCAR & Vehicle Technologies. Advanced Vehicle Testing Activity: *Dodge Ram Wagon Van - Hydrogen/CNG Operations Summary*. <http://avt.inel.gov/pdf/hydrogen/dodgereport.pdf>

<sup>77</sup> <http://en.wikipedia.org/wiki/Gasoline>, se Energy content.

energiforbruket blir dermed 51,2 MJ pr 10 km. Energiinnholdet i bensin er oppgitt til 9,67 kWh pr liter som blir 15,5 kWh per 10 km <sup>78</sup>.

En studie fra MIT anslår energiforbruket for en hybrid-bil med brenselcelle i 2020 til 0,81 MJ eller 0,225 kWh pr km. Bilen har brenselcelle drevet med hydrogen i tillegg elektrisk motor drevet med batteri <sup>79</sup>.

## Effektivitet

Med termo-dynamisk effektivitet menes hvor mye av varmen som er input til prosessen som omdannes til arbeid <sup>80</sup>. Med arbeid menes hvor mye av energien i et system som blir overført til et annet system ved tilstandsending av systemet som avgir energi. Termo-dynamisk effektivitet måler dermed hvor mye energi som er ført videre fra systemet etter tilstandsending i prosent av den totale input-energi til systemet. På grunn av termodynamikkens første lov kan ikke prosentandelen være *mer* enn 100%. Denne loven tilsier at energi ikke kan tilintetgjøres, bare omformes. På grunn av varmetap og friksjon vil prosentandelen aldri være *lik* 100%.

Med energi-effektivitet mener vi den mengde energi som kommer ut av en prosess i prosent av den energien som er input for prosessen. Med energi-input inkluderes både energi i materialer som går inn i prosessen og energi som tilføres utenfra.

## Elektrolyse av vann

Energi-effektiviteten til elektrolyse av vann har blitt anslått til 50-80% <sup>81</sup>. Disse anslagene tar ikke hensyn til tap ved produksjon av elektrisitet, de tar bare hensyn til hvor mye av energien i elektrisiteten som føres videre i hydrogenet. Ved anode-siden i elektrolysen vil hydroksid-ionene avgi to elektroner til den elektriske kretsen. Denne endringen i elektroner krever mer energi enn hydroksid-ionenes potensial til å avgi elektroner skulle tilsi. Dette kalles overpotensial – mer energi må tilføres som går tapt som varme. Dette påvirker energi-effektiviteten til elektrolysen.

## Damp-reformering

Det er anslått at den termodynamiske effektiviteten til damp-reformering er mellom 70-85% basert på netto kalori-verdi eller nedre brennverdi ("lower heating value") <sup>82</sup>. Den faktiske verdien avhenger av renheten til hydrogenet. I CUTE-prosjektet hadde byene Madrid og Stuttgart egne anlegg for reformering av gass. Det er oppgitt en effektivitet på 65% basert på den lavere brennverdi for hydrogen og naturgass <sup>83</sup>. SINTEF anslår virkningsgraden for damp-reformering til 70% <sup>84</sup> dersom naturgassen transporteres flytende til et *lokalt* reformeringsanlegg. Dersom naturgass brukes i et *sentralt* reformeringsanlegg er virkningsgraden høyere siden energien som trengs for å gjøre gassen

---

<sup>78</sup> Energiinnholdet målt i MJ og kWh er ikke direkte kalkulerbart fra hverandre slik det er oppgitt i

<http://en.wikipedia.org/wiki/Gasoline> . Vi har valgt å bruke de oppgitte verdiene.

<sup>79</sup> Weiss, M.A, Heywood, J.B. Drake, E.M., Schafer, A., AuYeung, F.F.: *On the Road in 2020*, Energy Laboratory MIT, Cambridge, Massachusetts, October 2000, <http://fee.mit.edu/public/el00-003.pdf> , side 1-15.

<sup>80</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Thermodynamic\\_efficiency](http://en.wikipedia.org/wiki/Thermodynamic_efficiency)

<sup>81</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Electrolysis\\_of\\_water](http://en.wikipedia.org/wiki/Electrolysis_of_water), se under Efficiency

<sup>82</sup> *ibid.*

<sup>83</sup> [http://www.fuel-cell-bus-](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf)

[club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/CUTE\\_Technology\\_Brochure.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf), side 23.

<sup>84</sup> [http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen\\_energi\\_baerer.pdf](http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen_energi_baerer.pdf), side 35

flytende kan brukes til produksjon av energi. SINTEF anslår virkningsgraden for sentrale reformeringsanlegg til 73% <sup>85</sup>.

Til sammenlikning har en dieselmotor en termo-dynamisk effektivitet på 25% <sup>86</sup>. Store lastebiler, busser og nyere diesel-biler kan ha en effektivitet på opp mot 45% <sup>87</sup>. Et kullkraftverk som produserer elektrisitet vil ha en termo-dynamisk effektivitet på høyst 46% <sup>88</sup>. Sammenlignet med disse prosessene har produksjon av hydrogen ved damp-reformering en høy termo-dynamisk effektivitet.

### Brenselcelle

Effektiviteten til en brenselcelle kan måles på to måter: Med tank-to-wheel effektivitet mener vi den energien som forbrukes ved framdrift relativt til energien som ble fylt på kjøretøyets tank. Denne effektiviteten sier noe om virkningsgraden til brenselcellen, hvor mye av energien i hydrogenet som går videre til kjøretøyets elektriske motor.

Dagens tank-to-wheel effektivitet anslås å ligge på 45% <sup>89</sup>. Dette forutsetter at strømuttaket er lavt siden spenningen synker med økende strømuttak. Den lave effektiviteten skyldes først og fremst at prosessen i en brenselcelle produserer varme som ikke blir nyttiggjort. Brennverdien til hydrogen ("upper heating value") er på 3,54/Nm<sup>3</sup> <sup>90</sup>. Dette svarer til 1,48 V. En brenselcelle produserer strøm på 0,7 V <sup>91</sup>. Dette gir en virkningsgrad eller effektivitet på 47%. Videre må luften som tas fra luftinntaket på kjøretøyet tørkes og settes under trykk før den kan tilføres brenselcellen. Dette vil også redusere virkningsgraden for brenselcellen.

Tank-to-wheel effektivitet for et brenselcelle-kjøretøy anslås til 36% når det benyttes et kjøremønster definert som "New European Driving Cycle". Dette er en kjøresyklus som er ment å være typisk for Europa <sup>92</sup>. Den sammenliknbare tank-to-wheel verdien med samme kjøremønster for et diesel-kjøretøy oppgis til 22% <sup>93</sup>.

Honda hevder at deres FCX Clarity bil med brenselcelle og et lithium-batteri for støttefunksjoner har en effektivitet på 60% <sup>94</sup>. Denne effektiviteten omfatter bare virkningsgrad for framdrift av kjøretøyet, ikke for produksjon av hydrogen forut i kjeden.

Hydrogenets brennverdi brukes ikke i sin helhet til produksjon av elektrisitet. Den delen som går med til elektrisitetsproduksjon kaller vi elektrisitets-virkningsgrad. Resten slippes ut som varme. Deler av denne varmen kan nyttiggjøres, blant annet til varmeapparat i kjøretøy som går på brenselceller <sup>95</sup>. Varmen blir sluppet ut til luft via varmevekslere som er koplet til kjøretøyets varmeapparat. I følge SINTEF kan 50% av den delen av hydrogenets brennverdi som ikke brukes til produksjon av

---

<sup>85</sup> ibid., side 35.

<sup>86</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Thermodynamic\\_efficiency](http://en.wikipedia.org/wiki/Thermodynamic_efficiency)

<sup>87</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Diesel\\_engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_engine), se Power and fuel economy.

<sup>88</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Thermodynamic\\_efficiency](http://en.wikipedia.org/wiki/Thermodynamic_efficiency)

<sup>89</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell)

<sup>90</sup> [http://www.fuel-cell-bus-](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf)

[club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/CUTE\\_Technology\\_Brochure.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf), side 45

<sup>91</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell), se Fuel cell efficiency.

<sup>92</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/New\\_European\\_Driving\\_Cycle](http://en.wikipedia.org/wiki/New_European_Driving_Cycle)

<sup>93</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell), se In practice.

<sup>94</sup> <http://corporate.honda.com/press/article.aspx?id=4351>

<sup>95</sup> [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/DETAILED\\_SCREEN.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/DETAILED_SCREEN.pdf), side 53

elektrisitet i brenselcellen gjøres om til varme som kan brukes i kjøretøyet<sup>96</sup>. Denne delen kaller vi varme-virkningsgraden. SINTEF regner med elektrisitets-virkningsgrad på 36%<sup>97</sup> for en brenselcelle-bil. Vi kan dermed beregne varme-virkningsgraden til  $(100-36)*,5=32\%$ . Samlet virkningsgrad (varme-virkningsgrad pluss elektrisitets-virkningsgrad) for brenselceller blir dermed 68%.

En annen form for beregning av effektivitet for brenselcellen tar hensyn til hele kjeden fra energikilden til elektrisitet for framdrift av kjøretøyet. Dette kalles en Power-plant-to-wheel effektivitet. Målingen tar hensyn til produksjon, transport og lagring av drivstoff (hydrogen) i tillegg til verdier målt med tank-to-wheel effektivitet. Beregninger for hele kjeden antyder en effektivitet på 22% for komprimert hydrogen og 17% for hydrogen i flytende form<sup>98</sup>. Omdanning av hydrogen fra gass til flytende form krever mye energi som reduserer virkningsgraden for energikildene som er brukt til å produsere hydrogenet. Beregningene for Power-plant-to-wheel effektivitet er gjort for elektrisitetsmiks i USA.

Effektiviteten kan også måles som grid-to-wheel effektivitet. Dette er framdriftsenergien i prosent av all energi som tilføres fra uttak av elektrisitetsnett til produksjon av framdriftsenergi. For en brenselcelle er denne virkningsgraden fra grid-to-wheel på bare 23%. Elektrolyse av vann har en virkningsgrad på 70%, kompressor som kreves til transport av hydrogen har en virkningsgrad på 90% og brenselcella har en virkningsgrad på 36%. For hele kjeden blir virkningsgraden  $0,7*0,9*0,36=0,23$  eller 23%. I disse beregningene er det ikke tatt hensyn til virkningsgraden for energikilder som brukes til å produsere elektrisitet til nettet for elektrolyse av vann.

En kinesisk studie<sup>99</sup> viser at drivverk med batteri som får ekstern strøm er mer effektivt enn drivverk med batteri som får strøm fra brenselcelle. Batteriet brukes blant annet ved oppstart av kjøretøyet, til å drive luftpumpe for bremses og til styresystemet.

Batteriet har høyere spenning enn brenselcella. Jo høyere spenning brenselcella skal levere jo mindre effektiv er den<sup>100</sup>. Dette innebærer at krav til høyere spenning medfører flere brenselceller i kjøretøyet. Den lavere spenningen fra brenselcella må konverteres før den kan brukes i batteriet. Drivverk uten slik konvertering er mer effektive enn system med konverter. I drivverk uten konvertering av spenning må batteriet tilføres strøm utenfra.

### Hydrogen forbrenningsmotor

BMW hevder at de har utviklet en modell for hydrogen forbrenningsmotor sammen med Universitetet i Graz, Østerrike, med en effektivitet på 52%<sup>101</sup>. Det er ikke oppgitt hva slags effektivitet det er tale om, men det antas å være framdriftseffektivitet. Effektiviteten måler med andre ord hvor mye av hydrogenet som blir omgjort til framdrift av kjøretøyet. BMW selv hevder dette er på høyde med de beste turbodiesel-motorene. Modellen bruker hydrogen sammen med en forbrenningsmotor hvor en gnist eller tenning tilføres forbrenningskamrene hvor hydrogen blandes med luft. Hydrogen har ifølge BMW bedre forbrenningsegenskaper enn diesel, i den forstand at mindre av energien i drivstoffet går tapt i forbrenningen.

<sup>96</sup> [http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen\\_energibaerer.pdf](http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen_energibaerer.pdf), side 31.

<sup>97</sup> ibid., side 41. Tallet er basert på "standard europeisk kjøresyklus".

<sup>98</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell), se avsnittet In practice.

<sup>99</sup> <http://journal.library.iisc.ernet.in/vol200502/paper5/97.pdf>

<sup>100</sup> ibid., side 99

<sup>101</sup> <http://www.theautochannel.com/news/2009/03/12/453159.html>

## Produksjonsanlegg

Effektiviteten til produksjonsanleggene ble målt i CUTE-prosjektet. Prosjektet hadde produksjonsanlegg med både elektrolyse av vann, damp-reformering og tilførsel fra sentrale produksjonsanlegg. Effektiviteten ble målt som energiforbruk relativt til den lavere brennverdi til hydrogen.

Effektiviteten ble målt på to måter. For det første ble effektiviteten bare for produksjonen målt. Dette omfatter generering av selve hydrogenet i tillegg til rensing av gassen etter generering. For det andre ble effektiviteten til hele anlegget målt. Det omfatter energi til kompresjon og fylling i tillegg til energi for selve produksjonen. Tabell 2 viser resultatet.

Tabell 2 Effektivitet for ulike produksjonsanlegg i CUTE-prosjektet <sup>102</sup>

By	Produksjons- type	Effektivitet (%)	
		Produksjon	Anlegg
Amsterdam	Elektrolyse	59,5	54
Hamburg <sup>#</sup>	Elektrolyse	57	45
Madrid	Damp-reformering		37
Stuttgart	Damp-reformering	33	32

<sup>#</sup> I Hamburg ble det laget en spesiell bygning for lagring av hydrogen. Dette "is-boks" liknende bygget krever mye energi. Derfor er avviket mellom effektivitet for produksjon og anlegg større enn for de andre byene.

Tabell 2 viser klart at anleggene med elektrolyse av vann er mer effektive enn anlegg med damp-reformering.

Det vil også være tap av hydrogen ved produksjonsanleggene. Dette skyldes at komponentene må renses for hydrogen i tillegg til lekkasje av produsert hydrogen til luft. Tap er målt som avviket mellom den mengde hydrogen som ble produsert og den mengde hydrogen som ble fylt på tanken.

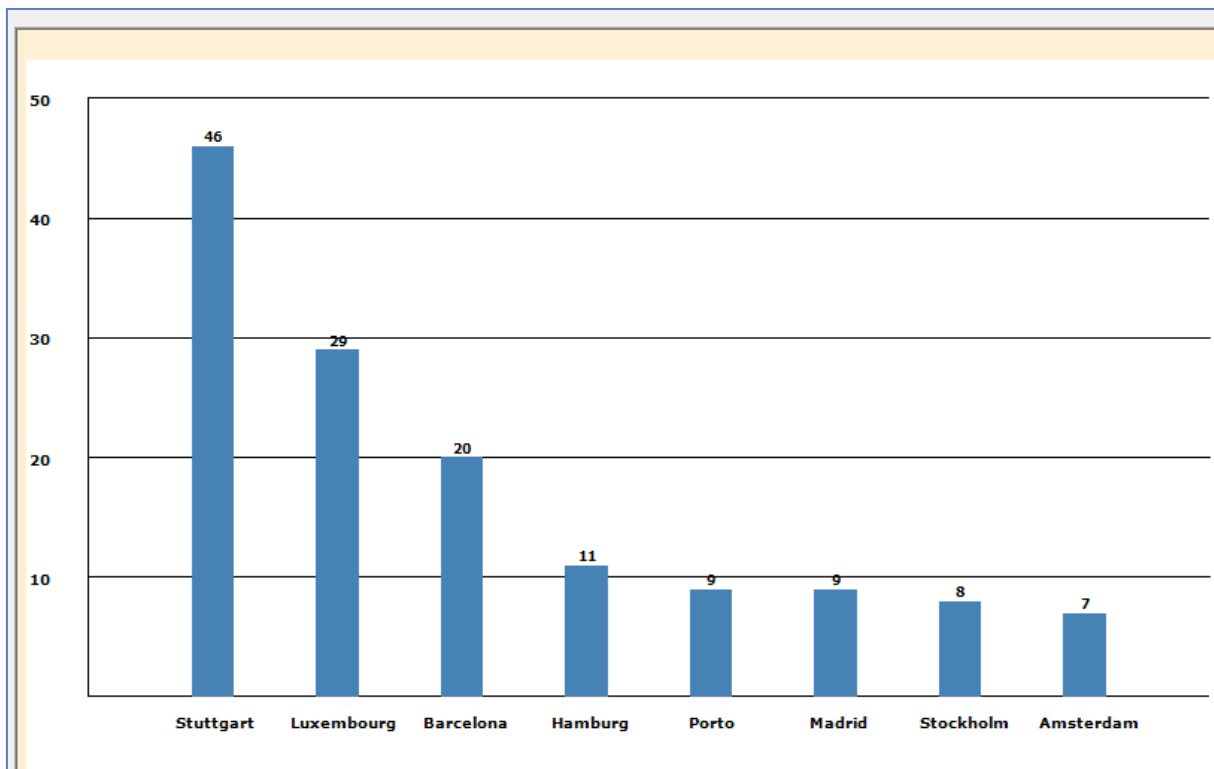
Figur 4 viser resultatet. London er ikke tatt med i oversikten siden byen fikk tilførsel av flytende hydrogen. Figuren viser at tapsprosenten varierer betydelig. Dette skyldes en del spesielle forhold ved enkelte anlegg. Blant annet ble anlegget i Stuttgart kjørt kontinuerlig på 50% kapasitet selv om det ikke var behov for hydrogen til fylling. Ideelt burde produksjonsanleggene bare slås av og på etter behov for fylling. I Stuttgart viser det seg at dette ikke var mulig i den grad man ønsket. Siden anlegget måtte kjøres kontinuerlig måtte mye hydrogen slippes ut til luft i stedet for å bli fylt på bussene. Med Stuttgart er det gjennomsnittlige tapet 17,3%, uten Stuttgart er gjennomsnittet 13,3%.

Figur 4 Hydrogentap ved produksjon- og fyllingsanlegg i CUTE-prosjektet. <sup>103</sup>

<sup>102</sup> [http://www.fuel-cell-bus-](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/DETAILED_SCREEN.pdf)

[club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/DETAILED\\_SCREEN.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/DETAILED_SCREEN.pdf), side 36

<sup>103</sup> ibid., side 37



## Oppsummering

Vi skal til slutt beregne brutto direkte energibruk for ulike kjøretøy som bruker hydrogen som drivstoff. Hydrogen er mest aktuelt for kjøretøy med varierende kjøremønster med lav belastning<sup>104</sup>. Dette gjør hydrogen til et egnet drivstoff for personbiler og busser. For andre kjøretøy er hydrogen som drivstoff mindre aktuelt. Vi skal derfor se på bruk av hydrogen som drivstoff for brenselcelle i personbiler og busser.

Med brutto direkte energibruk mener vi her well-to-wheel, altså hele kjeden fra utvinning av energikilde, bruk av denne energikilden til å produsere hydrogen og bruk av hydrogen i transportmiddelet. Vår definisjon er hentet fra Høyer (2009)<sup>105</sup>. Kjeden omfatter tre element:

1. Well-to-grid
2. Grid-to-tank
3. Tank-to-wheel

Det første leddet, well-to-grid, omfatter utvinning, produksjon og transport av energikilden som brukes til produksjon av hydrogen. Vi skal se på to slike kilder ("well"), vannkraft og gasskraft. Gasskraft kan brukes til å produsere elektrisitet som benyttes til produksjon av hydrogen ved elektrolyse av vann, på samme måte som vannkraft. Men gasskraft kan også brukes direkte til

<sup>104</sup> [http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen\\_energi\\_baerer.pdf](http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen_energi_baerer.pdf), side 38.

<sup>105</sup> Høyer, K.G.: *Høyhastighetstog. Analyser av direkte og brutto direkte energiforbruk*. Høgskolen i Oslo, TDM-Rapport 1/09, side 3: "Som begrepet uttrykker er brutto direkte energiforbruk det direkte energiforbruket pluss noe til, dvs. pluss det som kreves for å produsere og frambringe denne energien. Det (brutto direkte) er altså det direkte energiforbruket inkludert alle energitapene ved produksjon, omdanning og distribusjon av denne energien."

produksjon av hydrogen ved gassreforming siden naturgass inneholder metan som igjen inneholder hydrogen.

Det andre leddet omfatter produksjon av hydrogen. Denne produksjonen innebærer energitap siden ikke all energiinnholdet i energikilden, f.eks. vannkraft, vil bli overført til hydrogenet. Videre omfatter leddet energitap forbundet ved transport av hydrogen fra produksjonsanlegget til tankanlegg. Vi har også valgt å inkludere tap ved fylling av hydrogen i dette leddet. I en analyse av energibruk for jernbanen inkluderer Høyer (2009)<sup>106</sup> interne tap i det siste leddet, tank-to-wheel. Høyer peker på at disse interne tapene i overføringsnettene for jernbanen er sammenliknbare med tap av energi som oppstår ved fylling av drivstoff for andre transportmiddel som fly, buss og bil. Disse tapene omfatter søl og spill som oppstår ved fylling av drivstoff. For å gjøre sammenlikningen med andre drivstoff letterer inkluderer vi disse tapene i leddet grid-to-tank. Tallene som oppgis for direkte framdriftsenergi for transportmidlene kommer ofte fra kilder som ikke omfatter fyllingstap i tank-to-wheel leddet.

Vi vil spesifisere energitapet som er forbundet med alle komponentene i alle ledd slik at en komponent, f.eks. spillenergi, kan flyttes over i andre ledd etter behov.

Det siste leddet, tank-to-wheel, omfatter energien som brukes til framdrift av transportmiddelet.

### Tapsmultiplikatorer

Vi skal forsøke å beregne direkte energibruk, grid-to-wheel energibruk og brutto direkte energibruk for en hydrogenbuss fra CUTE-prosjektet og en brensel-celle bil med hydrogen produsert av norsk vannkraft.

Tabell 3 viser tall som skal brukes til å beregne brutto direkte energiforbruk. Dette forbruket kan splittes inn i tre former for effektivitet, tank-to-wheel + grid-to-tank + well-to-grid. Hver av disse formene for effektivitet utgjør et ledd i kjeden fra energikilde til bruk av hydrogen i brenselcelle. Vi vil bruke effektivitet synonymt med virkningsgrad. Vi skal følge Høyer (2009) og beregne tapsmultiplikatorer for hvert ledd i kjeden. Når vi kjenner effektiviteten vil vi beregne tapsmultiplikatorer slik<sup>107</sup>:

#### Likning 1 Beregning av tapsmultiplikator

$$m = \frac{1}{\left(\frac{e}{100}\right)}$$

hvor  $e$  er effektivitetsprosenten og  $m$  er tapsmultiplikatoren. For vannkraft kjenner vi bare tapsmultiplikatoren. Den effektivitetsprosenten som ga en spesifikk tapsmultiplikator kan beregnes slik:

#### Likning 2 Beregning av effektivitetsprosent fra tapsmultiplikator

$$e = \left(\frac{1}{m}\right) * 100$$

---

<sup>106</sup> ibid., side 21

<sup>107</sup> Se <http://de.wikipedia.org/wiki/Wirkungsgrad>, avsnitt Anlagenwirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad. En samlet kjedevirkningsgrad på 72,9% fører til at 137 watt må brukes som input i hele kjeden for å produsere 100 watt. Dette gir  $1/0,729=1,371$  som tapsmultiplikator.



hvor  $m$ =tapsmultiplikator (kjent),  $x$  er den ukjente effektivitetsverdi på andelsform og  $e$  er den samme verdien som prosentandel.

De fleste tall i tabell 2 er diskutert ovenfor. Høyér<sup>108</sup> presenterer en tapsmultiplikator for norsk vannkraft. Multiplikatoren tar høyde for tap i rørgater og tunneler, turbiner og generatorer, energibruk i kraftverket (til sammen 15%) og gjennomsnittlig tap ved overføring av elektrisk kraft i det nasjonale strømnettet (5%). Ved å bruke Likning 1 Likning 2 har vi beregnet effektiviteten til å være 79 prosent for norsk vannkraft levert i støpsel ("grid").

Tabell 3 Effektivitetstall for hydrogen

Hydrogen-buss			Inngår i
Kategori	Verdi	Enhet	
Framdriftsenergi hydrogenbuss fra CUTE-prosjektet	8,27	kWh / km	Tank-to-wheel
Framdriftsenergi for brenselcelle-bil	0,333 <sup>109</sup>	kWh / km	Tank-to-wheel
Framdriftsenergi for brenselcelle-bil 2020	0,225	kWh / km	Tank-to-wheel
Effektivitet brenselcelle	68 <sup>110</sup>	Prosent	Tank-to-wheel
Fyllingseffektivitet (inkl. kompressor ved fylling)	90,8	Prosent	Grid-to-tank
Kompressor-effektivitet ved transport av hydrogen	90	Prosent	Grid-to-tank
Effektivitet ved produksjon av hydrogen	59,5 <sup>111</sup>	Prosent	Grid-to-tank
Virkningsgrad ved produksjon av vannkraft	79	Prosent	Well-to-grid
Virkningsgrad ved produksjon av naturgass	94 <sup>112</sup>	Prosent	Well-to-grid
Virkningsgrad ved produksjon av elektrisitet fra gasskraft med CO <sub>2</sub> -håndtering	49 <sup>113</sup>	Prosent	Well-to-grid
Virkningsgrad ved produksjon av elektrisitet fra gasskraft uten CO <sub>2</sub> -håndtering	58 <sup>114</sup>	Prosent	Well-to-grid

SINTEF anslår energitapet i kraftnettet til 8%<sup>115</sup>. Det er litt uklart hva dette omfatter. Om det omfatter bare overføringstapet vil tapet være større enn hva Høyér bruker. Om energitapet omfatter tap i rørgater, tunneler og turbiner er tapet mindre enn his Høyér.

Vi har fulgt et oppsett hos Høyér (2009)<sup>116</sup> for beregning av direkte energibruk. Vi har ikke klart å finne tall for tilbakeført bremseenergi og standard stillstandsenergi. Effektiviteten til brenselcella inkluderer energi til komfortvarme i bussen siden dette ble hentet fra varmen som produseres fra brenselcellene. I motsetning til Høyér har vi plassert tap ved fylling av drivstoff i leddet grid-to-tank. Hos Høyér er dette plassert i leddet tank-to-wheel.

<sup>108</sup> Høyér (2009), side 30.

<sup>109</sup> [http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen\\_energibaerer.pdf](http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen_energibaerer.pdf), side 60. Forbruket er oppgitt til 1 kg hydrogen pr 100 km. Med en brennverdi på 33,33 kWh/kg (nedre brennverdi) gir dette 0,333 kWh eller 1,2 MJ pr km.

<sup>110</sup> Inkluderer både elektrisitets-virkningsgrad (36%) og varme-virkningsgrad beregnet til 32,5%.

<sup>111</sup> Dette er effektiviteten i elektrolyse-anlegget til Amsterdam i CUTE-prosjektet, se [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/DETAILED\\_SCREEN.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/DETAILED_SCREEN.pdf), side 36

<sup>112</sup> [http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen\\_energibaerer.pdf](http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen_energibaerer.pdf), side 24.

<sup>113</sup> ibid., side 45.

<sup>114</sup> ibid., side 45.

<sup>115</sup> ibid., side 41.

<sup>116</sup> ibid., side 20-21

## Norsk vannkraft

### Buss

Alle tapsmultiplikatorer (eksklusive multiplikatoren for vannkraft) er beregnet med utgangspunkt i tabell 2 og likning 1.

Tabell 4 Beregning av brutto direkte energibruk for hydrogenbuss med hydrogen produsert fra norsk vannkraft

	Kategori	Verdi	Enhet
A	Framdriftsenergi pr km	8,27	kWh
B	Brenselcelle	1,47	Tapsmultiplikator
$C=A*B$	Tank-to-wheel pr km (direkte energi)	12,2	kWh
D	Fyllingseffektivitet (inkl. kompressor ved fylling)	1,101	Tapsmultiplikator
E	Produksjon av hydrogen ved elektrolyse av vann	1,681	Tapsmultiplikator
F	Transport av hydrogen	1,111	Tapsmultiplikator
$G=C*D*E*F$	Grid-to-wheel energibruk pr km	25,00	kWh
$H=G-C$	Grid-to-tank energibruk pr km	12,84	kWh
I	Norsk vannkraft	1,21	Tapsmultiplikator
$J=G*I$	Well-to-wheel energibruk (brutto direkte) pr km	30,25	kWh
$K=J/(0,21*30)$	Well-to-wheel energibruk pr passasjerkm	4,80	kWh

Tabell 4 viser resultatet. Det er forutsatt sentralt anlegg for elektrolyse, følgelig er det beregnet tap ved transport av hydrogen<sup>117</sup>. Vi har antatt at lokale anlegg for produksjon av hydrogen via elektrolyse bare er aktuelt i prøveprosjekt, i et stort fungerende marked er det derimot ikke aktuelt. Fra en tank-to-wheel energibruk på 8,27 kWh (29,8 MJ) pr km øker well-to-wheel energibruken til 30,25 kWh (108,72 MJ) pr km.

I CUTE-prosjektet hadde en buss plass til 30 passasjerer. Dette gir 30 sete-km for hver tilbakelagt km. Med tallene over får vi  $30,25/30$  gi 1,008 kWh (3,63 MJ) pr sete-km. Med en utnyttelsesgrad på 21% vil forbruket være 4,8 kWh (17,3 MJ) pr passasjer-km. Alle tall for passasjer-km i de følgende tabeller er beregnet ved å brukte samme utnyttelsesgrad på 0,21 og setekapasitet 30.

Vi kan også gjøre beregningene andre veien ved å gjøre om alle tapsmultiplikatorer til virkningsgrad-verdier for de ulike ledd i kjeden etter likning 2. Dermed kan vi beregne virkningsgraden for hele kjeden fra energikilde til produksjon av elektrisitet i brenselcellen. Tabell 5 viser resultatet.

Med energikilden produsert av norsk vannkraft vil virkningsgraden til hele energikjeden være omlag 0,27 eller 27%. Det skulle tilsi at for hver kWh produsert i norske vannkraftverk vil 0,27 kWh bli tilført kjøretøyet som energi fra brenselcellen. Resten er tap fra vannkraft, fra elektrolyse av vann for å produsere hydrogen, fra kompresjon av hydrogen til transport, fra fylling av hydrogen på tank og fra varmeproduksjon fra brenselcellen som ikke omdannes til energi ved framdrift av kjøretøyet.

<sup>117</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen\\_vehicle](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_vehicle)

Tabell 5 Kjedevirkningsgrad for hydrogenbuss med hydrogen produsert av norsk vannkraft

	Kategori	Virkningsgrad
A	Framdriftsenergi	1,00
B	Brenselcelle	0,68
C=A*B	Tank-to-wheel	0,68
D	Fyllingseffektivitet (inkl. kompressor ved fylling)	0,91
E	Produksjon av hydrogen	0,60
F	Kompressor-effektivitet ved transport av hydrogen	0,90
G=C*D*E*F	Grid-to-wheel energibruk	0,33
H=C-G	Grid-to-tank	0,35
I	Norsk vannkraft	0,83
J=G*I	Well-to-wheel kjedevirkningsgrad (brutto direkte)	0,27

Til sammenlikning finner SINTEF<sup>118</sup> at en brenselcelle-bil har en kjede-virkningsgrad på 21% dersom elektrisiteten til elektrolyse kommer fra norsk vannkraft.

### Bil

Vi bruker de samme taps-multiplikatorene som for buss. Eneste forskjell er framdriftsenergien for bilen. Vi har regnet med at 50% av overskuddsvarmen fra brenselcelle brukes i bilens varmeapparat. Framdrifts-energien settes til 0,1 kg hydrogen pr 10 km som tilsvarer 0,3941 kWh (1,42 MJ) pr km. Det forutsettes sentrale anlegg for elektrolyse av vann til produksjon av hydrogen. Tabell 6 viser resultatet.

Tabell 6 Brutto direkte energiforbruk og virkningsgrad for personbil med brenselcelle og hydrogen produsert med elektrolyse.

Kategori	Verdi	Enhet
Well-to-wheel energibruk (brutto direkte) pr km	1,44	kWh
Well-to-wheel energibruk pr passasjerkm (44% kapasitetsutnyttelse med 4 seter <sup>119</sup> )	0,82	kWh
Kjedevirkningsgrad	27	Prosent

Vi finner samme kjede-virkningsgrad som for buss med samme energikilde for produksjon av hydrogen. Vi får et beregnet forbruk på 0,82 kWh per passasjerkm med 44% kapasitetsutnyttelse og 4 seter i personbilen.

### Naturgass

#### Buss

Naturgass kan brukes til å produsere elektrisitet for elektrolyse av vann. Vi skal imidlertid se på reformering av naturgass til hydrogen som er en mer energieffektiv måte å bruke naturgassen på. Vi forutsetter sentrale anlegg for reformering med transport. Det er lagt inn en virkningsgrad på naturgass på 94% som gir en tapsmultiplikator på 1,06.

<sup>118</sup> [http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen\\_energibaerer.pdf](http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen_energibaerer.pdf), side 55

<sup>119</sup> Høyser, K.G.: *Høyhastighetstog. Analyser av direkte og brutto direkte energiforbruk*. Høgskolen i Oslo, TDM-Rapport 1/09, side 25

For buss blir tapsmultiplikatoren slik:

**Tabell 7 Beregning av brutto direkte energibruk for hydrogenbuss med hydrogen produsert ved gassreforming fra naturgass**

	Kategori	Verdi	Enhet
A	Framdriftsenergi pr km	8,27	kWh
B	Brenselcelle	1,470	Tapsmultiplikator
C=A*B	Tank-to-wheel pr km	12,2	kWh
D	Fyllingseffektivitet (inkl. Kompressor ved fylling)	1,101	Tapsmultiplikator
E	Produksjon av hydrogen	1,370	Tapsmultiplikator
F	Kompressor-effektivitet ved transport av hydrogen	1,111	Tapsmultiplikator
G=C*D*E*F	Grid-to-wheel energibruk pr km	20,37	kWh
H=G-C	Grid-to-tank energibruk pr km	8,2	kWh
I	Naturgass	1,060	Tapsmultiplikator
J=G*I	Well-to-wheel energibruk (brutto direkte) pr km	21,59	kWh
K=J/(0,21*30)	Well-to-wheel pr passasjerkm	3,43	kWh

Well-to-wheel energibruk pr passasjerkilometer går ned fra 4,8 til 3,43 kWh i forhold til buss med hydrogen fra elektrolyse. Det skyldes at virkningsgraden ved gassreforming er høyere enn hva den er for produksjon av hydrogen ved elektrolyse (73% <sup>120</sup> mot 59,5% <sup>121</sup>).

Kjede-virkningsgraden for brenselcelle i buss med hydrogen fra gassreforming anslås til 38% slik det er vist i Tabell 8.

**Tabell 8 Kjedefirkningsgrad for buss med brenselcelle på hydrogen fra gass-reforming**

	Kjedefirkningsgrad	
A	Framdriftsenergi	1,00
B	Brenselcelle	0,68
C=A*B	Tank-to-wheel	0,68
D	Fyllingseffektivitet (inkl. Kompressor ved fylling)	0,91
E	Produksjon av hydrogen	0,73
F	Kompressor-effektivitet ved transport av hydrogen	0,90
G=C*D*E*F	Grid-to-wheel energibruk	0,41
H=C-G	Grid-to-tank energibruk	0,27
I	Naturgass	0,94
J=G*I	Well-to-wheel kjedefirkningsgrad (brutto direkte)	0,38

<sup>120</sup> [http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen\\_energibaerer.pdf](http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen_energibaerer.pdf) side 35.

<sup>121</sup> [http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store\\_folder/Publications/DETAILED\\_SCREEN.pdf](http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/DETAILED_SCREEN.pdf) side 36, måling fra Amsterdam.

## Bil

Forutsetningene for bil med hydrogen fra gass-reformering er de samme som for buss. Det antas at overskudds-varme fra brensel-celle kan brukes i bilens varmeapparat. Framdriftsenergien for bilen er satt til 0,3941 kWh (1,42 MJ) pr km på samme måte som for hydrogen fra elektrolyse.

Tabell 9 Brutto direkte energiforbruk og virkningsgrad for personbil med brenselcelle og hydrogen produsert med gass-reformering.

Kategori	Verdi	Enhet
Well-to-wheel energibruk (brutto direkte) pr km	1,03	kWh
Well-to-wheel energibruk pr passasjerkm (44% kapasitetsutnyttelse med 4 seter <sup>122</sup> )	0,59	kWh
Kjedevirkningsgrad	38	Prosent

Tabell 9 viser at kjede-virkningsgraden går opp fra 27% til 38% med skifte fra elektrolyse til gass-reformering. Forbruket pr passasjerkm går ned fra 0,82 til 0,59 kWh per passasjerkm.

## Elektrisitet fra gasskraftverk

I denne kjeden forutsettes det at elektrisitet til elektrolyse av vann kommer fra gasskraft. Gasskraft har en virkningsgrad på 49% med CO<sub>2</sub>-håndtering og 58% uten CO<sub>2</sub>-håndtering. I tillegg er det lagt inn en virkningsgrad på 92% i overføringsnettet (8% tap) <sup>123</sup>. Dette gir en samlet taps-multiplikator på 2,22 for gasskraftverk med CO<sub>2</sub>-håndtering og 1,87 for gasskraftverk uten CO<sub>2</sub>-håndtering.

Det forutsettes et sentralt anlegg for elektrolyse av vann. Det er lagt inn en virkningsgrad for transport av hydrogen på 90% som skyldes energibruk til komprimering. Tabell 10 viser resultatet.

## Buss

Det forutsettes lokale anlegg for elektrolyse slik at hydrogen ikke skal transporteres.

Tabell 10 Beregning av brutto direkte energibruk for hydrogenbuss med hydrogen produsert ved elektrolyse og elektrisitet fra gasskraftverk

	Kategori	Verdi	Enhet
A	Framdriftsenergi pr km	8,27	kWh
B	Brenselcelle	1,47	Tapsmultiplikator
C=A*B	Tank-to-wheel	12,2	kWh
D	Fyllingseffektivitet (inkl. Kompressor ved fylling)	1,101	Tapsmultiplikator
E	Produksjon av hydrogen	1,68	Tapsmultiplikator
F	Kompressor-effektivitet ved transport av hydrogen	1,111	Tapsmultiplikator
G=C*D*E*F	Grid-to-wheel energibruk	24,98	kWh
H=G-C	Grid-to-tank energibruk	12,83	kWh
I	Gasskraftverk med CO <sub>2</sub> -håndtering	2,220	Tapsmultiplikator

<sup>122</sup> Høyer, K.G.: *Høyhastighetstog. Analyser av direkte og brutto direkte energiforbruk*. Høgskolen i Oslo, TDM-Rapport 1/09, side 25

<sup>123</sup> [http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen\\_energibaerer.pdf](http://www.sft.no/nyheter/dokumenter/hydrogen_energibaerer.pdf) side 45.

J	Gasskraftverk uten CO2-håndtering	1,870	Tapsmultiplikator
K=G*I	Well-to-wheel energibruk pr km <b>med</b> CO2-håndtering	55,46	kWh
L=G*J	Well-to-wheel energibruk pr km <b>uten</b> CO2-håndtering	46,72	kWh
M=K/(0,21*30)	Well-to-wheel pr passasjerkm med CO2-håndtering	8,80	kWh
N=L/(0,21*30)	Pr passasjerkm med uten CO2-håndtering	7,42	kWh

Tabell 11 Kjede-virkningsgrad for buss med brenselcelle på hydrogen fra elektrolyse med elektrisitet fra gasskraftverk

	Kjede-virkningsgrad	Verdi
A	Framdriftsenergi	1,00
B	Brenselcelle	0,68
C=A*B	Tank-to-wheel	0,68
D	Fyllingseffektivitet (inkl. Kompressor ved fylling)	0,91
E	Produksjon av hydrogen	0,60
F	Kompressor-effektivitet ved transport av hydrogen	0,90
G=C*D*E*F	Grid-to-wheel virkningsgrad	0,33
H=C-G	Grid-to-tank virkningsgrad	0,35
I	Gasskraftverk med CO2-håndtering	0,45
J	Gasskraftverk med CO2-håndtering	0,53
K=G*I	Well-to-wheel kjede-virkningsgrad <b>med</b> CO2-håndtering	0,15
L=G*J	Well-to-wheel kjede-virkningsgrad <b>uten</b> CO2-håndtering	0,18

Tabell 11 viser kjede-virkningsgraden for buss med brenselcelle og hydrogen produsert med elektrisitet fra gasskraftverk. Både med og uten CO2-håndtering er dette de laveste kjede-virkningsgradene så langt for hydrogen i buss med brenselcelle. Følgelig finner vi den høyeste energibruken pr passasjer-km for de kjeder vi har analysert i tabell 10.

## Bil

Forutsetningene er de samme som for buss. Tabell 12 viser resultatet.

Tabell 12 Brutto direkte energiforbruk og virkningsgrad for personbil med brenselcelle og hydrogen produsert med elektrolyse og elektrisitet fra gasskraftverk.

Well-to-wheel energibruk pr km for gasskraft med CO2-håndtering	2,64	kWh
Well-to-wheel energibruk pr km for gasskraft uten CO2-håndtering	2,23	kWh
Well-to-wheel energibruk pr passasjerkm (44% kapasitetsutnyttelse med 4 seter) for gasskraft med CO2-håndtering	1,50	kWh
Well-to-wheel energibruk pr passasjerkm (44% kapasitetsutnyttelse med 4 seter) for gasskraft uten CO2-håndtering	1,27	kWh
Kjede-virkningsgrad for gasskraft uten CO2-håndtering	0,149	Prosent

Kjedevirkningsgrad for gasskraft med CO2-håndtering	0,175	Prosent
---	-------	---------

## Oppsummering

Tabell 13 Brutto direkte energibruk kWh pr vognkm for buss og personbil med hydrogen under ulike forutsetninger om energikilde

Well-to-wheel energibruk kWh pr km	Buss	Bil
Elektrolyse med elektrisitet fra vannkraft	30,25	1,44
Gass-reformering	21,59	1,03
Gasskraft med CO2-håndtering	55,46	2,64
Gasskraft uten CO2-håndtering	46,72	2,23

Tabell 14 Brutto direkte energibruk kWh pr passasjerkm for buss og personbil med hydrogen under ulike forutsetninger om energikilde

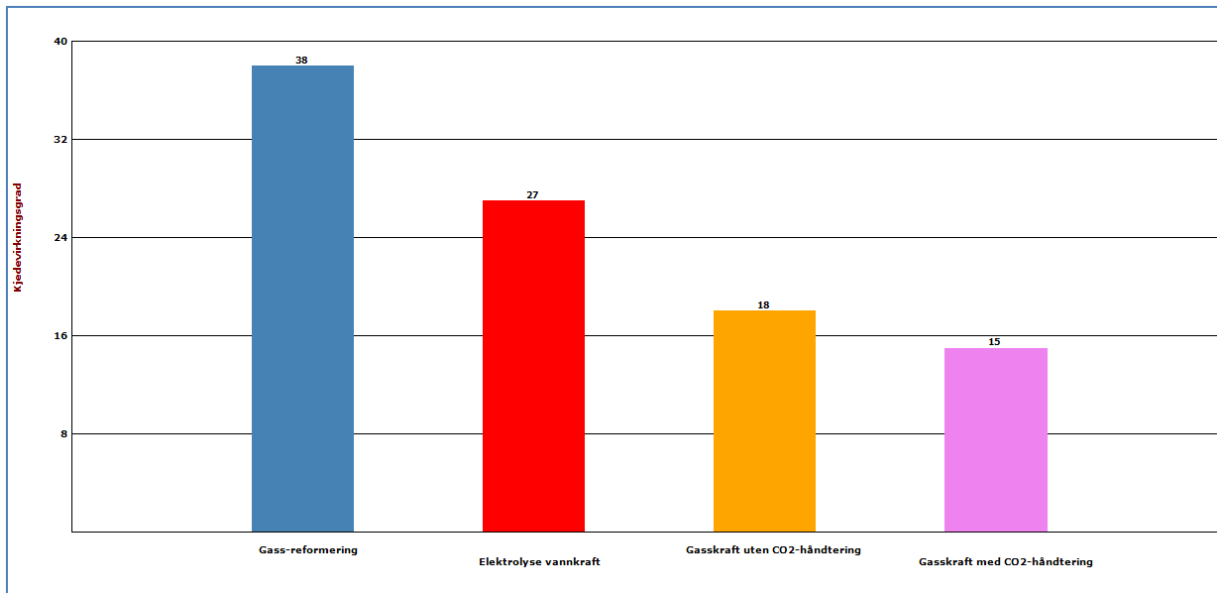
Well-to-wheel energibruk pr passasjerkm kWh	Buss	Bil
Elektrolyse med elektrisitet fra vannkraft	4,80	0,82
Gass-reformering	3,43	0,58
Gasskraft med CO2-håndtering	8,80	1,50
Gasskraft uten CO2-håndtering	7,42	1,27

Tabell 15 Kjede-virkningsgrad for buss og personbil med hydrogen under ulike forutsetninger om energikilde

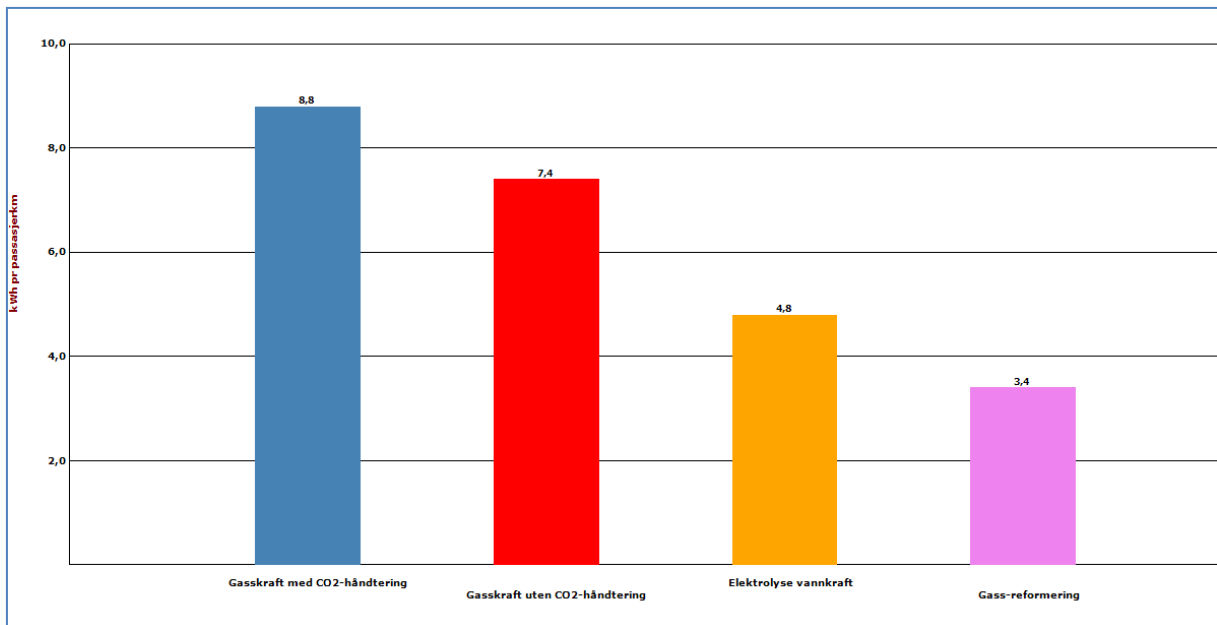
Kjedevirkningsgrad i prosent	Buss og bil
Elektrolyse med elektrisitet fra vannkraft	27%
Gass-reformering	38%
Gasskraft med CO2-håndtering	15%
Gasskraft uten CO2-håndtering	18%

Tabell 15 viser at hydrogen produsert med gass-reformering oppnår den høyeste kjede-virkningsgrad både for buss og bil. Den laveste kjede-virkningsgrad kommer fra gasskraft, både med og uten CO2-håndtering. Buss og bil har samme virkningsgrad siden det forutsettes sentrale produksjonsanlegg og transport av hydrogen for begge transporttypene.

Figur 5 Kjedevirkningsgrad i prosent for buss og bil med hydrogen fra ulike energikilder og produksjonsmåter



Figur 6 Energibruk kWh pr passasjerkm for brenselcelle-drevet buss med hydrogen produsert fra ulike energikilder





Figur 7 Energibruk kWh pr passasjerkm for brenselcelle-drevet personbil med hydrogen produsert fra ulike energikilder

