



LAPPEENRANNAN  
TEKNILLINEN YLIOPISTO

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**SÄHKÖTEKNIIKAN OSASTO**

---

KANDIDAATINTYÖ

28.02.2009

## **Akku ja vetypolttokenno sähköauton voimanlähteenä**

Petteri Palmumaa  
Korpimetsänkatu 6-8 B15  
53850 Lappeenranta  
puh. +358 40 5428258

# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta, Sähkötekniikan osasto  
Sähkötekniikan diplomi-insinöörin koulutusohjelma

Petteri Palmumaa

## **Akku ja vetypolttokenno sähköauton voimanlähteenä**

Kandidaatintyö

2009

42 sivua, 8 kuvaa, 6 taulukkoa ja 2 liitettä.

Tarkastaja: Professori Jarmo Partanen

Hakusanat: Sähköauto, akku, vety, polttokenno

Tässä kandidaatintyössä on käsitelty akkuja ja vetypolttokennoja sähköauton voimanlähteenä. Työssä on esitelty sähköautojen ja niiden voimanlähteiden teknologioiden periaatteita, energiankantajia, hyötysuhteita ja päästöjä. Lisäksi on tarkasteltu polttomootorikäyttöisiä autotekniikoita vertailukohdan saamiseksi. Työn lopuksi on analysoitu sähköautojen markkinoita ja niiden yleistymiseen vaikuttavia tekijöitä.

Sähköautot mahdollistavat vaihtoehtoisten energialähteiden käytön, joka antaa tilaisuuden saasteiden ja päästöjen keskitettyyn vähentämiseen ja talteenottoon. Niiden avulla päästään myös pois öljyriippuvuudesta ja paikallisesti aiheutuneista päästöistä. Nykyisten polttoaineiden helpon käsiteltävyyden, kohtuullisien energiatiheyksien ja laajojen infrastruktuurien vuoksi käytössä olevien tekniikoiden syrjäyttäminen on vaikeaa. Uusiin tekniikoiden etuja ja haittoja voidaan tarkastella yksinkertaisilla metodeilla, kuten kustannusten, hyötysuhteiden, päästöjen ja polttoaineiden elinkaarien vertailulla. Vertailua vaikeuttaa tosin hintatasojen ja verotuksen eroavaisuudet eri maissa, ja se on siksi suoritettava osin maakohtaisesti. Suurimpia esteitä uusille tekniikoille ovat tällä hetkellä niiden tuomat lisäkustannukset, infrastruktuurien puuttuminen ja nykyisten polttoaineiden korvaaminen toisella.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology

Faculty of technology, department of electricity engineering

Program of Master of Science in electrical engineering

Petteri Palmumaa

### **Electricity and hydrogen fuel cell as a power source of an electric car**

Bachelor's thesis

2009

42 pages, 8 figures, 6 tables and 2 appendices.

Supervisor: Professor Jarmo Partanen

Keywords: Electric car, battery, hydrogen, fuel cell

This bachelor's thesis concentrates on batteries and hydrogen fuel cells as a power source of an electric car. Energy carriers, efficiencies and emissions of the electric cars and their power sources have also been presented in the thesis. To achieve datum reference, internal-combustion engine powered car techniques have also been included. Electric car markets and the factors affecting their commonness have been analyzed at the end of the thesis.

Electric cars make the use of alternative energy sources possible. This enables centralized reducing and capturing of pollutants and emissions. It also puts an end to the dependence of oil and locally caused emissions. Present techniques are difficult to replace, because of easy handling, reasonable energy densities and wide infrastructures of today's fuels. The benefits and the disadvantages of new techniques can be studied with simple methods like life cycle comparison of costs, efficiencies, emissions and fuels. Differencies in price levels and taxations in different countries make comparison difficult, and thus it has to be done separately for each country. Additional costs of new techniques, lack of needed infrastructures and replacement of present fuels are the biggest obstacles for new techniques.

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>SÄHKÖAUTOJEN TEKNOLOGIA .....</b>	<b>5</b>
2.1	Sähköakkuauton periaatteet .....	7
2.1.1	Sähköakkuauton akusto .....	8
2.2	Vetypolttokennoauton periaatteet .....	12
2.2.1	Vetypolttokenno .....	15
<b>3</b>	<b>SÄHKÖ JA VETY AUTON POLTTOAINEENA .....</b>	<b>18</b>
3.1	Polttoaineiden ja energiankantajien valmistus .....	19
3.1.1	Sähköntuotanto .....	19
3.1.2	Vedyn tuotanto .....	20
3.1.3	Bensiinin ja dieselin tuotanto .....	21
3.2	Polttoaineiden ja energiankantajien logistiset ketjut .....	21
3.2.1	Sähkönsiirto .....	21
3.2.2	Vedyn logistinen ketju .....	22
3.2.3	Bensiinin ja dieselin logistiset ketjut .....	23
<b>4</b>	<b>ERI TEKNIKOIDEN HYÖTYSUHTEET JA PÄÄSTÖT .....</b>	<b>24</b>
4.1	Hyötysuhteet .....	24
4.1.1	Sähköakkuauton kokonaishyötysuhde .....	24
4.1.2	Vetypolttokennoauton kokonaishyötysuhde .....	26
4.1.3	Polttomootoriauton kokonaishyötysuhteet .....	27
4.2	Polttoaineiden ja energiankantajien aiheuttamat hiilidioksidipäästöt .....	29
<b>5</b>	<b>SÄHKÖAUTOJEN MARKKINAT JA YLEISTYMINEN .....</b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>YHTEENVETO .....</b>	<b>34</b>
	<b>LÄHDELUETTELO .....</b>	<b>36</b>
<b>LIITTEET:</b>	<b>I LASKENTAESIMERKKI HYÖTYSUHTEISTA</b>	
	<b>II LASKENTAESIMERKKI</b>	
	<b>POLTTOAINEKUSTANNUKSISTA</b>	

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

### Lyhenteet

a	Vuosi
AC	Alternating current
CCS	Carbon capture and storage
DC	Direct current
DOD	Depth of discharge
Li-ion	Litium-ioni
Li-SOCl <sub>2</sub>	Litium-thionylkloriitti
Ni-Cd	Nikkeli-kadmium
Ni-MH	Nikkeli-metallihydridi
Pb-PbO <sub>2</sub>	Lyijy-lyijyoksidi
PEM	Polymer electrolyte membrane
PTW	Plant to wheel
Rpm	Revolutions per minute
USABC	United States advanced battery consortium
US DOE	United States department of energy
WTW	Well to wheel

### Muuttujat

<i>C</i>	Akuston kapasiteetti ampeeritunneissa
<i>E</i>	Energian kulutus
<i>h</i>	Hinta
<i>K</i>	Kustannus
<i>L</i>	Energiatiheys
<i>l</i>	Matka
<i>M</i>	Moolimassa
<i>m</i>	Massa
<i>p</i>	Paine
<i>R</i>	Moolinen kaasuvakio
<i>T</i>	Lämpötila
<i>V</i>	Tilavuus
$\lambda$	Hyötysuhde

**Alaindeksit**

akseli	Akselilla tehtävä työ
b	Bensiini
ba	Bensiini-auto
d	Diesel
da	Diesel-auto
k	Kulutus
kok	Kokonais
v	Vety
va	Vetypolttokennoauto
s	Sähkö
saa	Sähköakkuauto

## 1 JOHDANTO

Ajoneuvojen tekniikka tukeutuu nykyään vahvasti fossiilisiin polttoaineisiin ajoneuvojen energialähteenä. Vuosien saatossa onkin ajauduttu tilanteeseen, jossa ei vaihtoehtoisia polttoaineita öljylle juuri ole. Riippuvuus öljystä, öljyn hinnan nousu ja sen hintojen suuret vaihtelut ovat aiheuttaneet päänvaivaa niin yksilö- kuin valtiotasolla. Myös tutkimukset fossiilisten polttoaineiden vaikutuksista ilmastonmuutokseen ovat nostaneet energiatehokkuuden ja ympäristöystävällisyyden yhä tärkeämmiksi aiheiksi ajoneuvo-sovelluksissa. Nämä seikat ovat kiihdyttäneet rajusti niin uusien kuin vanhojen vaihtoehtoisten tekniikoiden kehitystä.

Vaihtoehtoisia tekniikoita nykyisten polttomoottorisovellusten tilalle on monia, mutta mikään näistä ei ole vielä onnistunut syrjäyttämään nykyistä ajoneuvotekniikkaa. Kaksi tekniikkaa on kuitenkin monine etuineen onnistunut nousemaan vakavasti otettavaksi vaihtoehdoksi polttomoottoritekniikkaan verrattuna. Toinen tekniikoista on jo ennen 1900-lukua hallinnut ajoneuvotekniikka, jossa ajoneuvo saa tarvittavan energiansa akkuihin varatusta sähköenergiasta. Toinen on jo 1800-luvun alkupuolella keksitty, mutta vasta 1990-luvulla suuremman kehityksen kohteeksi päätynyt polttokenno, josta nimenomaan vetyä polttoaineenaan käyttävä polttokenno on nykyään varteenotettavin vaihtoehto. (Tekno 2009; Sähköautot 2009)

Tämä kandidaatintyö on luonteeltaan kirjallisuustutkimus, jossa kartoitetaan sähköakku- ja vetypolttokennoauton tekniikat ja niiden ominaisuudet. Tarkoituksena on esitellä keskeisimmät eroavaisuudet tekniikoiden ja energialähteiden osalta. Työssä käsitellään myös eri tekniikoiden hyötysuhteita ja päästöjä, joita verrataan nykyisiin polttomoottorisovelluksiin. Aihepiirin laajuuden takia aiheet on pyritty käsittelemään suurimmaksi osaksi pääpiirteittäin, eikä tiettyihin yksityiskohtiin ole puututtu.

Sähköautot, joihin sähköakkuauto ja vetypolttokennoautot kuuluvat, ovat yhä suuremman kiinnostuksen kohteena fossiilisten polttoaineiden kallistuessa ja ilmastonmuutoksen jatkuessa. Sähköautot ovatkin kehittyneet huomattavasti viime aikoina ja niistä on tehty paljon tutkimusta. Myös muutamia tuotantolinjoja on avattu ja sähköautojen tulevaisuus saattaa määräytyä seuraavina vuosikymmeninä.

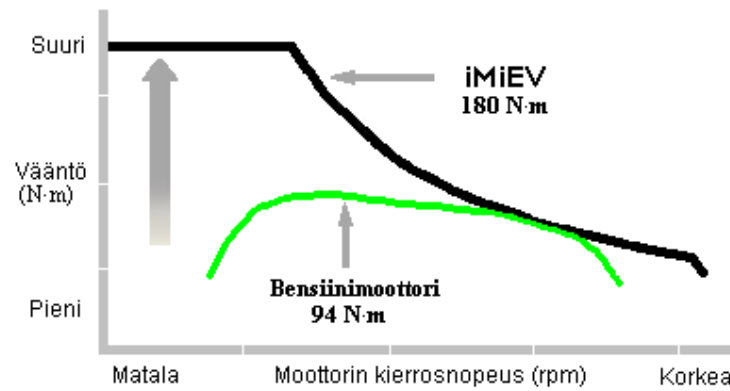
## 2 SÄHKÖAUTOJEN TEKNOLOGIA

Sähköautoilla tarkoitetaan autoja, joiden voimanlähteenä toimii yksi tai useampi sähkömoottori. Sähkömoottorin tarvitsema sähköenergia saadaan esimerkiksi auton akkuihin ja superkondensaattoreihin varastoidusta energiasta, tai se voidaan tuottaa autossa muun muassa polttokennolla tai generaattorilla monesta vaihtoehtoisesta polttoaineesta.

Sähköauton moottorina voidaan käyttää AC- (Alternating current) tai DC- (Direct current) moottoreita. AC-moottorit käyttävät vaihtovirtaa ja DC-moottorit tasavirtaa. AC-moottorilla on suuri vääntömomentti ja laaja tehollinen kierroslukualue, minkä vuoksi se ei tarvitse sähköautossa erillistä vaihteistoa. AC-moottoria ei juuri tarvitse huoltaa, ja sen jäähdytys on helppo toteuttaa ilma- ja nestejäähdytyksellä. DC-moottorilla taas on kapea tehollinen kierroslukualue, jonka takia se vaatii useasti vaihteiston sähköautokäytössä. Hiiliharjallinen DC-moottori vaatii myös huoltoa 2000 – 10000 kilometrin välein ja sen jäähdytys nestejäähdytyksellä on ongelmallista. DC-moottori on hankintahinnaltaan AC-moottoria halvempi, mutta hyötysuhteeltaan huonompi. Aikaisemmin sähköautoissa on käytetty useasti DC-moottoreita, koska niiden säädettävyys oli helppoa jännitettä ja virtaa muuttamalla. AC-moottorien säätämiseen käytetyt taajuusmuuttajat ovat kuitenkin kehittyneet ja nykyään käytetään pääasiassa AC-moottoreita vaihteettomuuden ja hyvän teho/paino-hyötysuhteen takia. Koska AC-moottorit ovat sähköautojen uusi trendi, oletetaan tässä työssä sähköautojen käyttävän AC-moottoria ja taajuusmuuttajaa sen säätäjänä. (Pyrhönen 2005; Sähköautot 2009)

Sähkömoottori tuottaa suuren väännön pienilläkin kierroksilla. Polttomoottoriin verrattuna sähkömoottorista saadaan suurin vääntömomentti heti kiihdytyksen alussa, kun polttomoottorilla joudutaan lisäämään paljon kierroksia vääntömomentin aikaansaamiseksi. Kuvassa 2.1 on esitelty Mitsubishiin valmistaman iMiev-sähköauton moottorin tuottama vääntömomenttikäyrä. Vertailun vuoksi on samasta autokokoluokasta otettu kuvaan myös turboahdetun bensiinimoottorin vääntömomentti. (Mitsubishi 2009)





Kuva 2.1 Sähkömoottorin ja turboahdetun bensiinimoottorin vääntömomentti moottorin kierrosnopeuden funktiona. (Mitsubishi 2009)

Nykyisiä sähkömoottoreita voidaan myös käyttää generaattoreina. Tämä mahdollistaa sähköautoissa jarrutusenergian talteenoton. Jarrutuksen aikana sähkömoottori toimii generaattorina ja varaa sähköauton akkua. Jarrutuksesta regeneroitu energia, joka voi vastata jopa 10 % auton energiankulutuksesta, voidaan myöhemmin käyttää kiihdytykseen tai auton toimilaitteisiin. (Kendall 2008).

Sähköautotekniikoista yleistyneimmät ovat akuista ja vetypolttokennosta saatavalla sähköenergialla toimivat sähköautot. Ne ovat myös todennäköisimmät polttomoottorin syrjäyttäjät, mistä syystä tässä työssä keskitytään pääosin näihin tekniikoihin. Täysin akkuihin varatun energian varassa toimivia autoja kutsutaan monesti sähköautoiksi ja vetypolttokennoilla varustettuja autoja vetyautoiksi, mutta tässä akkukäyttöisiä autoja kutsutaan sähköakkuautoiksi ja vetypolttokennoilla varustettuja autoja vetypolttokennoautoiksi.

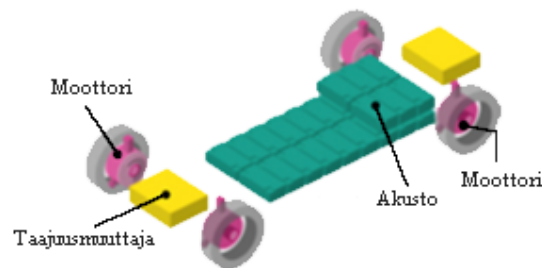
Polttomoottorikäyttöisiin autoihin verrattuna sähköautot eivät tuota paikallisesti päästöjä ja ovat käytännössä äänettämiä, mutta muuten sähköautot eroavat tekniikaltaan polttomoottoriautoista varsin vähän. Tekniikaltaan suurimmat eroavaisuudet ovat käytettävä energianlähde, polttomoottorin vaihtuminen taajuusmuuttajaan ja yhteen tai useampaan sähkömoottoriin sekä pakoputkiston ja -kaasujen suodatusjärjestelmien poistuminen. Käytettäessä suoraan vetäviin pyöriin sijoitettuja sähkömoottoreita ei myöskään voimansiirron osia tarvita.

Sähköautoilla pyritään pääsemään vähintään samoilla kokonaiskustannuksilla samoihin toimintasäteisiin, kuljetuskapasiteetteihin ja ajomukavuuksiin kuin polttomoottorikäyt-

töisillä autoilla. Sähköauton tulisi myös toimia samoissa olosuhteissa kuin normaali polttomootoritekniikkaan perustuva ajoneuvo.

## 2.1 Sähköakkuauton periaatteet

Sähköakkuautolla tarkoitetaan ajoneuvoa, jossa energia saadaan akkuihin varatusta energiasta. Tätä varten sähköakkuautossa on yleensä suuri määrä akkuja eli akusto, joka syöttää sähköä sähkömoottorille. Sähköakkuauton muita komponentteja ovat taajuusmuuttaja, akun varaaja ja akuston tilan seurantajärjestelmä. Taajuusmuuttajalla saadaan säädettyä sähkömoottorin pyörimisnopeutta, eli toisin sanoen auton nopeutta. Akusto varataan sähköverkosta akkuvaraajalla. Akuston varaustilaa, lämpötilaa ja sen mahdollisia vikoja seurataan erillisellä järjestelmällä, jonka avulla voidaan estää akuston rikkoutuminen, pidentää sen elinikää ja tarvittaessa kytkeä irti vioittunut osa akustosta. Kuvassa 2.2 on esitetty sähköakkuauton pääosat ja niiden vaihtoehtoinen sijoitus autossa. (Berdichevsky 2006; Mitsubishi 2008)



Kuva 2.2 Sähköakkuauton pääosat. (Mitsubishi 2008)

Sähköakkuauton komponenttien sijoitus ei ole moottoria lukuun ottamatta kovin kriittistä. Tämä tuo mahdollisuuden auton vapaammalle muotoilulle, varsinkin käytettäessä pyöriin sijoitettuja sähkömoottoreita. Akusto koostuu monesta kohtuullisen pienestä akkukennosta, minkä johdosta ne ovat helppo sijoittaa haluamallaan tavalla autoon. Tämä antaa mahdollisuuden optimoida auton painopiste ja siten parantaa auton hallittavuutta.

Sähköakkuautoon ”tankataan” eli akustoon varataan energiaa sähköverkosta, joko huoltoasemilla tai kotona. Auton ”tankkaus” on myös mahdollista vaihtamalla valmiiksi varattu akku tyhjentyneen tilalle. Auton toimintasäde ja akuston latausaika riippuu paljon akuston tyypistä, mitoituksesta ja auton ominaisuuksista. Sähköakkuauton tarvitseman

akuston ja sähkömoottorin kokoon voidaan vaikuttaa samalla tavalla kuin polttomoottoriautoissa moottorin ja bensatankin kokoon, kuten keventämällä auton kokonaispainoa, pienentämällä korin ilmanvastusta ja renkaiden vierintävastusta. Näitä ominaisuuksia ja suurta massaa varten tarvitaan suhteessa suurempi moottori, ja sen energiakulutuksen vuoksi suuremman määrän energiaa varaava akusto (Kendall 2008).

Sähköakkuauton akusto voi painaa satoja kiloja, ja siihen voidaan yleensä varata kymmenen tai kymmeniä kilowattitunteja energiaa. Akustoon varattava energia vastaa energiamäärältään vain muutamia litroja bensiiniä, mutta sähköakkuauton korkeasta kokonaishyötysuhteesta johtuen sähköakkuautoon ei tarvitse varata polttomoottoriauton tarvitsemia energiamääriä. Akuston koosta, akkujen varaajasta, käytettävästä latausjännitteestä, sallitusta virrasta ja käytetyn sähköverkon vaiheiden määrästä riippuen akuston latausajat voivat vaihdella kymmenistä minuuteista kymmeneen tuntiin. (Berdichevsky 2006; Mitsubishi 2009)

Sähköakkuauton komponenttien hyvästä hyötysuhteesta johtuen, ne eivät tuota paljoakaan lämpöä. Kylmillä alueilla, joissa auton sisätiloja on lämmitettävä ajomukavuuden ja turvallisuuden takaamiseksi, joudutaan sähköakkuautoon lisäämään lämmitin. Lämmittimen käyttö lyhentää sähköakkuauton toimintasädetä noin 15 – 20 %, riippuen lämmittimen tehosta ja akuston mitoituksesta. Auto voidaan tietenkin tarvittaessa lämmitellä jo valmiiksi ennen ajomatkaa sähköverkosta saatavalla virralla. Tällöin lämmittimen vaikutus ajomatkan pituuteen vähenee. (Sähköautot 2009)

Huolto- ja korjaustoimenpiteistä aiheutuvat kustannukset ovat sähköakkuautossa pienet. Sähköakkuauton moottori- ja akkujärjestelmissä ei ole juurikaan huoltoa kaipaavia kohteita. Normaalit polttomoottoriautoon tehtävät öljyjen, tulppien ja hihnojen vaihdot jäävät pois. Suurimmat sähköakkuauton tuomat uudet korjaustoimenpiteet liittyvätkin todennäköisesti sulakkeiden vaihtoon. (Sähköautot 2009)

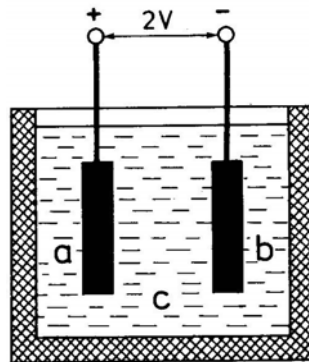
### *2.1.1 Sähköakkuauton akusto*

Akku on laite, johon voidaan varastoida energiaa ja tarvittaessa vapauttaa varastoitu energia sähköisessä muodossa. Akku eroaa paristosta siten, että paristossa elektrodien reaktiot kulkevat vain yhteen suuntaan, eikä sitä voi varata uudelleen. (Pynnä 1984)

Akkutekniikoita on monia ja energian varastointiin on olemassa monia erilaisia ratkaisuja. Akuksi voidaan muun muassa sanoa laitetta, joka varastoi energian liike-energiaksi pyörivään massaan eli vauhtipyörään, josta liike-energia voidaan muuntaa generaattorilla sähköenergiaksi. Yleensä akku käsitetään kuitenkin laiteeksi, joka varastoi sähköenergiaa kemiallisessa muodossa, jota tässä työssä käytetäänkin akun määrittelmänä.

Akku on kokonaisuus, joka koostuu monesta sarjaan kytketystä sähkökemiallisesta kennosta. Akusto taas sen sijaan koostuu monesta sarjaan tai rinnan kytketyistä akuista. Sähköakkuauton tapauksessa akustolla tarkoitetaan siis laitetta, joka koostuu monesta sähkökemiallisesta kennosta. (Hämeenöja 1993)

Sähkökemiallinen kenno varastoi energiaa kemiallisessa muodossa, josta energia voidaan muuntaa sähköiseksi potentiaalienergiaksi eli sähkövirraksi. Sähkökemiallisen kennon toiminnalliset osat ovat positiivinen ja negatiivinen elektrodi, eli anodi ja katodi, sekä elektrolyytti, johon elektrodit on upotettu. Yhden kennon jännitteen määrää elektrodeina käytettävien materiaalien elektrodipotentiaali. Esimerkiksi polttomoottori-autoissa yleensä käytetyn lyijyakun sähkökemiallisen kennon elektrodit koostuvat lyijystä ja lyijyoksidista ja elektrolyytti laimennetusta rikkihaposta. Lyijyakun kennojännite on noin 2 V ja polttomoottorilla varustetuissa henkilöautoissa lyijyaku koostuu yleensä kuudesta sarjaan kytketystä kennosta, jolloin akun napojen väliseksi jännitteeksi muodostuu 12 V. (Berndt 1997) Kuvassa 2.3 on havainnollistettu lyijyakun kennon periaate.



Kuva 2.3 Lyijyakun sähkökemiallisen kennon rakenne, jossa a pluselektrodi, b miinuselektrodi ja c elektrolyytti. (Pynnä 1984)

Akkuja valmistetaan muistakin materiaaleista kuin lyijy ja rikkihappo. Elektrodiin ja elektrolyytin erilaisilla valinnoilla voidaan vaikuttaa akun ominaisuuksiin, kuten akun kennojännitteeseen, energia-, teho- ja käyttöominaisuuksiin sekä hyötysuhteeseen. (Hämeenoja 1993)

Sähköakkuauton akusto eroaa monella tavalla normaaleissa polttomoottoriautoissa käytettävistä akuista. Polttomoottoriautossa akku on ns. käynnistysakku, eli akun täytyy kyetä luovuttamaan suuria käynnistystehoja nopeasti. Sen on pystyttävä luovuttamaan myös suuria virtoja muutamien minuuttien ajan kaupunkiliikenteessä, kun polttomoottorin generaattori ei kykene tuottamaan sähköä tarpeeksi. Sähköakkuautossa akusto on auton ainoa energianlähde, ja akuston on kyettävä antamaan autolle sen tarvitsemää energiaa koko toimintasäteellä. (Pynnä 1984)

Auton toimintasäde riippuu akuston mitoituksesta (paino/tilavuus) ja energiatiheydestä (Wh/kg). Auton kiihtyvyyteen ja esteen ylityskykyyn vaikuttaa akuston tehotiheys (W/kg). Sähköautossa akuston eliniän, eli purkaus- ja lataussyörien määrän tulisi olla mahdollisimman pitkä, jotta akkujen vaihtovälin tiheys ei muodostuisi kovin suureksi. Sähköakkuautossa akkujen varautuminen tulisi myös tapahtua nopeasti, jotta auton käytettävyys olisi polttomoottoriauton veroinen. (Hämeenoja 1993)

Autoteollisuus valmistaa ja kehittää sähköakkuautoja ja sähköakkuautojen tarvitsemia komponentteja. Tällä hetkellä sähköautoja ei kuitenkaan ole juuri tarjolla kuluttajille, jonka vuoksi sähköauton akuston tarkkoja vaatimuksia ei ole aikaisemmin ollut määritetty. Tätä varten autonvalmistajat ovat toimineet yhteistyössä toistensa kanssa USABC:n (United States Advanced Battery Consortium) kautta kehittääkseen ja määrittääkseen vaatimukset sähköakkuautojen akustolle. USABC:n määrittelemät vaatimukset akustolle on esitetty taulukossa 2.1. Taulukossa 2.1 on ominaisenergian ja energiatiheyden vaatimukset esitetty  $C/3$ -purkauskertoimella eli purkausvirralla, missä  $C$  on akuston kapasiteetti ampeeritunneissa. Sykli-ikä ilmoitetaan 80 % DOD:na (Depth of discharge) eli purkaussyvyytenä. (Miller 2002)

Taulukko 2.1 USABC:n tavoitteet sähköakkuautojen akustolle. (Miller 2002)

	Väliaikainen tavoite	Minimitavoite pitkäaikavälin kaupallistamiselle	Pitkäaikainen tavoite
Ominaisenergia (C/3 purkauskerroimella) [Wh/kg]	80	150	200
Energiatiheys (C/3 purkauskerroimella) [Wh/l]	135	230	300
Teho [W/kg]	150	300	400
Kestoikä [a]	5	10	10
Sykli-ikä (80% DOD)	600	1000	1000
Hinta [\$/kWh]	150	<150	100
Toimintalämpötila [°C]	-30 - +65	-40 - +50	-40 - +85
Normaali latausaika [h]	6	6	3-6

Sähköakkuautot pystyvät haastamaan polttomoottoriautot jokapäiväisenä liikennevälineenä, kun niiden ominaisuudet ovat kuluttajien vaatimusten ja tottumusten mukaisia. Sillä sähköakkuauton energiavarastona toimii ainoastaan akusto, on sähköakkuauton ominaisuuksilla ja hinnalla hyvin suuri merkitys. Akut ovatkin kehittyneet huomattavasti verrattuna vanhoihin lyijyakkuihin, ja akkujen kehitys jatkuu edelleen. Taulukossa 2.2 on esitelty muutamia yleisempiä markkinoilta saatavissa olevia akkutyyppejä ja niiden ominaisuuksia. Näitä ovat lyijy-lyijyoksiidi-(Pb-PbO<sub>2</sub>), nikkeli-kadmium-(Ni-Cd), nikkeli-metallihydridi-(Ni-MH), sekä litium-ioni-(Li-ion) akut. Taulukossa on esitetty myös Li-SOCl<sub>2</sub> (Litium-thionylkloridi)-akun energiatiheys, jota ei vielä markkinoilla tavata. Vertailukohteena taulukkoon on otettu bensiinin energiatiheys, ja bensiinistä auton polttomoottorissa 25 %:n hyötysuhteella saatava laskennallinen käytännön energiatiheys. Taulukon arvojen lähteet on esitetty tarkemmin työn lopussa olevassa lähdeluettelossa.

Taulukossa 2.2 esitettävällä purkautumisella [%/kk] tarkoitetaan montako prosenttia akun kapasiteetista purkautuu kuukaudessa itsestään. Hyötysuhde lasketaan akkuun varatun energian ja akusta purettaessa saatavan energian suhteesta. Hinta puolestaan kertoo montako dollaria yhden kilowattitunnin verran energiaa sisältävä akku maksaa. Taulukossa olevat arvot ovat suuntaa antavia teoreettista energiatiheyttä lukuun ottamatta.

Taulukko 2.2 Taulukossa on vertailtu muutamien eri akkutyypin ja bensiinimoottorin ominaisuuksia.

Akkutyyppi	Pb-PbO <sub>2</sub>	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion	Li-SOCl <sub>2</sub>	Bensiini
<b>Teoreettinen</b>						
<b>energiatiheys [Wh/kg]</b>	161 <sup>(3)</sup>	236 <sup>(3)</sup>	380 <sup>(5)</sup>	525 <sup>(5)</sup>	1480 <sup>(5)</sup>	12000 <sup>(9)</sup>
<b>Käytännön</b>						
<b>energiatiheys [Wh/kg]</b>	40 <sup>(3)</sup>	45 <sup>(3)</sup>	70 <sup>(8)</sup>	150 <sup>(5)</sup>	500 <sup>(5)</sup>	3000
<b>Energiatiheys [Wh/l]</b>	70–80 <sup>(3)</sup>	50–150 <sup>(6)</sup>	170 <sup>(8)</sup>	220 <sup>(5)</sup>	900 <sup>(5)</sup>	2250 <sup>(9)</sup>
<b>Teho [W/kg]</b>	180 <sup>(6)</sup>	150 <sup>(6)</sup>	630 <sup>(8)</sup>	800 <sup>(7)</sup>		
<b>Sykli-ikä</b>	500–1000 <sup>(3)</sup>	500–2000 <sup>(3)</sup>	1500 <sup>(6)</sup>	>1200 <sup>(7)</sup>		
<b>Purkautuminen [%/kk]</b>	3–4 <sup>(6)</sup>	20 <sup>(4)</sup>	30 <sup>(4)</sup>	5–10 <sup>(4)</sup>		
<b>Hyötysuhde [%]</b>	80 <sup>(2)</sup>	80–85 <sup>(4)</sup>	65 <sup>(2)</sup>	>90 <sup>(4)</sup>		
<b>Hinta [\$/kWh]</b>	100–300 <sup>(1)</sup>	350–800 <sup>(6)</sup>	500 <sup>(2)</sup>	300–1100 <sup>(1)</sup>		

1) Jones Chris. EV Battery Comparison Overview. North Bay Electric Auto Association. 2007.

2) Joshi R.P., Deshmukh, A.P. Hybrid Electric Vehicles: The Next Generation Automobile Revolution. 2006

3) Kiehne H.A. Batterien, Band 37, Kontakt 2 Studium, Elektrotechnik, Expert Verlag. Germany 1983.

4) Kim B.G. Tredeau F.P. Salameh Z.M. Performance Evaluation of Lithium Polymer Batteries for Use in Electric Vehicles. 2008.

5) Miles M.H. Recent Advances in Lithium Battery Technology. 2001.

6) Mpower. Battery and Energy Technologies. Battery Comparison. 2008.

7) Nishi Y. Katayama K. Shigetomi J. Horie H. The development of lithium-ion secondary battery systems for EV and HEV. 1998.

8) Ovshinsky S.R., Dhar S.K., Fetchenko M.A., Corrigan D.A., Reichman B., Young K., Fierro C. Venkatesan S., Gifford P., Koch J. Advanced Materials for Next Generation NiMH Portable, HEV and EV Batteries. 1999.

9) Motiva Oy. Kuljetusalan polttoainevaihtoehdot. Bensiini. 2008.

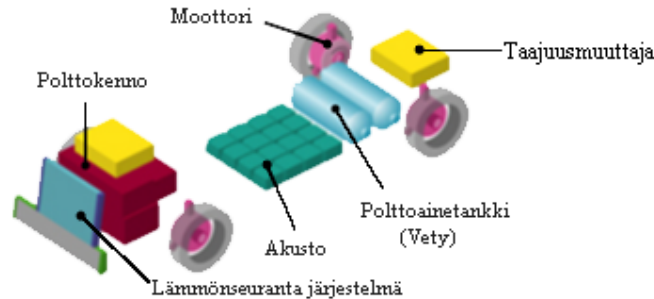
Taulukosta 2.2 nähdään, että jo markkinoilla olevien akkujen ominaisuudet alkavat vastata suurelta osin taulukosta 2.1 löytyvien USABC:n määrittelemiä vaatimuksia. Suurin ongelma onkin varmasti akkujen tämänhetkinen korkea hinta. Akun hintoihin saattaa vaikuttaa tällä hetkellä kohtuullisen vaatimattomat valmistusmäärät, ja hinta saattaakin alentua tuotantomäärien kasvaessa. Akkujen hintoja pitää myös verrata osaltaan öljyn ja sähkön hintaan, sillä öljyn hinnan noustessa, vähenee akkujen korkean hinnan merkitys. Tämä johtuu siitä, että sähköakkuauton käyttökustannukset ovat paljon polttomoottori-auton käyttökustannuksia pienemmät, ja korkeat akkujen hinnat kompensoituvat halpuihin ajokilometreihin.

## 2.2 Vetypolttokennoauton periaatteet

Vetypolttokennoautolla tarkoitetaan ajoneuvoa, jossa ajoneuvon tarvitsema energia tuotetaan vetypolttokennolla joko suoraan vedystä, tai jostakin osittain vedystä koostuvasta kaasusta. Vetypolttokennoautossa on mahdollista käyttää polttoaineina muita kaasuja,

joista reformerilla erotetaan vety polttokennolle, mutta tässä työssä oletetaan polttoaineena olevan puhdas vety.

Vetypolttokennoauton pääosat ovat vetypolttokennon lisäksi sähkömoottori, taajuusmuuttaja, polttoainetankki ja akusto. Suurimmat erot sähköakkuautoon ovat vetyä sisältävä polttoainetankki, josta polttokennolla tuotetaan sähköä sähkömoottorille, pienempi akusto ja vetypolttokennoa varten suurempi määrä lisäkomponentteja, kuten käsittely-, kierrätys- ja jäähdytysjärjestelmät. Taajuusmuuttajaa käytetään vetypolttokennoautossa samaan tarkoitukseen kuin sähköakkuautossa, eli säätämään sähkömoottoria. Kuvassa 2.4 on esitetty vetypolttokennon pääosat niiden mahdollisilla sijoituspaikoilla. (Larjola 2008)



Kuva 2.4 Vetypolttokennoauton pääosat. (Mitsubishi 2008)

Käytettävä polttoaine eli vety varastoidaan autossa olevaan polttoainetankkiin. Polttokennon kohtuullisen hyvän sähköisen hyötysuhteen ja vedyn on korkean energiatiheyden (142 MJ/kg) vuoksi, ei vetyä tarvita 400 kilometrin toimintasäteen takaamiseksi kuin noin 4 kilogrammaa. Vedyllä on kuitenkin hyvin pieni molekyylipaino (84 g/m<sup>3</sup>), joka käytännössä tarkoittaa, että 1 kg vetykaasua on normaaliolosuhteissa tilavuudeltaan 12 m<sup>3</sup>. Tämän takia tarvittavan vedyn varastointiin on käytettävä painesäiliötä, nesteytystä tai metallihydridiä käytännöllisten polttoainetankkien tilavuuksien mahdollistamiseksi. (Ellis 2001; Kendall 2008)

Käytettäessä painesäiliötä on 4 kilogrammaa vetyä paineistettava 34 MPa:n paineeseen, jotta saavutetaan alle 150 litran polttoainetankin tilavuus. Paineen aiheuttamien lujuusvaatimusten vuoksi, painesäiliön paino on suuri käytettäessä säiliön materiaalina terästä. Tästä syystä tutkijat yrittävät kehittää kevyistä komposiittimateriaaleista rakennettua painesäiliötä. (Ellis 2001)



Varastoitaessa vetyä nesteytettynä, on vety pidettävä -248 °C lämpötilassa. Tällöin neljä kilogrammaa vetyä vaatii noin 60 litran tilavuuden. Vedyn varastoiminen nesteytettynä hyvin alhaisissa lämpötiloissa on kuitenkin riskialtista ja vaatii kalliita ja monimutkaisia järjestelmiä. (Ellis 2001)

Metallihydriditankki on hyvä tapa varastoida vetyä varsinkin pienessä mittakaavassa. Huonona puolena on metallihydriditankin paino ja tilavuus. Esimerkiksi varastoitaessa litium-alumiini hydriditankkiin 57 litraa bensiiniä vastaava määrä vetyä, nousee tankin painoksi 270 kg ja tilavuudeksi 170 l. (Ellis 2001; Larjola 2008)

Polttoainetankin täyttäminen onnistuu vetypolttokennoautossa vetyä myyvillä huolto- asemilla ja täyttöasemilla. Autoon liitetään putki, jota pitkin asemalla oleva vety siirretään auton vetysäiliöön. Täyttäminen onnistuu nopeasti vain muutamassa minuutissa. Vetypolttokennoautoihin vetyä myyviä huolto- ja täyttöasemia on kuitenkin vielä hyvin harvassa. Tällä hetkellä vedyn täyttöasemia on maailmanlaajuisesti noin 100 kappaletta, joten auton vetysäiliön täyttäminen onnistuukin vain harvoissa maissa. Vetyhuolto- asemien määrä on kuitenkin nopeasti kasvamassa polttokennojen demonstraatio- ohjelmissa ympäri maailman. (Whatgreencar 2009)

Vetypolttokennoauton akusto on energian varastointikyvyltään sähköakkuauton akusto- on verrattuna pienempi. Tämä johtuu siitä, että vetypolttokenno tuottaa sähkömootto- rin tarvitseman sähköenergian, ja akustoa käytetään pääosin energiapuskurina. Akustoa käytetään tietysti myös lisälaitteiden käyttämiseen vetypolttokennon ollessa pois käy- töstä ja siihen voidaan myös varata jarrutuksissa sähkömoottorin avulla talteen saatava energia. (He 2008)

Vetypolttokennoautolla on kohtuullinen sähköinen hyötysuhde, mutta se tuottaa silti merkittävästi lämpöä sivutuotteenaan. Tätä varten vetypolttokennolle on oltava erillinen jäähdytysjärjestelmä. Kylmillä alueilla, joissa autoa joudutaan lämmittämään, voidaan vetypolttokennon tuottamaa lämpöä käyttää hyväksi myös auton lämmityksessä. Toisin kuin sähköakkuautossa, tällöin ei tarvita erillistä lämmitintä eikä polttoainetta kulu erik- seen auton lämmittämiseen.

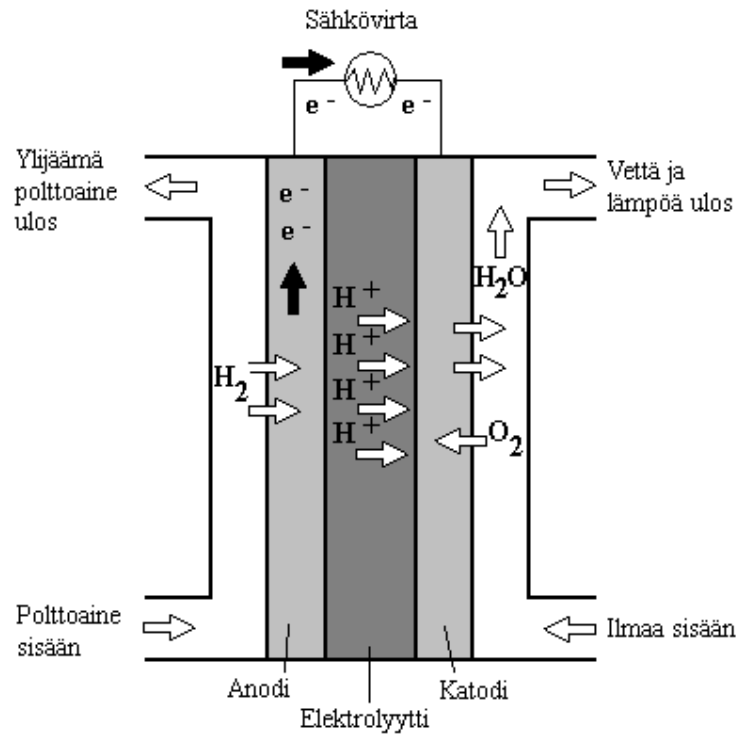
Vetypolttokennoautojen huolto- ja korjauskustannuksista ei ole vielä tietoa. Todennä- köistä on, että huolto- ja korjauskustannukset ovat hieman halvemmat verrattuna polt-

tomoottoriautoon vetypolttokennoautossa olevien liikkuvien osien vähemmästä määrästä johtuen. Kustannukset selviävät kun kyseisiä autoja aletaan myydä myös yksityishenkilöille leasing-sopimusten sijasta. (Whatgreencar 2009)

Vetyä voidaan myös polttaa polttomoottorissa. Jotkin autovalmistajat ovatkin esitelleet oman näkemyksensä vetyautosta, jossa paljon normaalia polttomoottoria muistuttavaa moottoria käytetään vedyllä. Tällöin auto ei juuri eroa bensiini- ja dieselautoista muutoin kuin polttoaineen osalta. Käytettäessä vetyä polttomoottorin polttoaineena hyötysuhde on kuitenkin verrattain huono, mistä syystä polttokennon käyttäminen tulevaisuudessa on todennäköisempää. (Motiva 2006)

### *2.2.1 Vetypolttokenno*

Vetypolttokenno on sähkökemiallinen laite, joka muuttaa hapettimen avulla vedyn kemiallisen energian suoraan sähköiseksi energiaksi. Vetypolttokenno koostuu kahdesta elektrodista; anodista ja katodista, sekä niitä erottavasta kalvosta eli elektrolyytistä. Kuvassa 2.5 on esitetty PEM (Polymer Electrolyte Membrane)-tyypin vetypolttokennon periaate. PEM-vetypolttokenno toimii kuvan 2.5 periaatteen mukaisesti siten, että happi, joka yleensä saadaan ilmasta, erotetaan vedystä kalvolla, joka ei johda kaasuja tai nesteitä, vaan vain yhdenlaisia ioneja. Laitteessa vety ja happi johdetaan kalvon eri puolille, vety anodille ja happi katodille. Kalvo on katalysoitu siten, että vety hajoaa peruskomponentteihin, jotka ionisoituvat. Ionisaatiossa vapautuvat elektronit johdetaan johdinta pitkin anodilta katodille niiden välissä olevan kuorman kautta. Katodilla happi varautuu johdinta pitkin tulevien elektronien vuoksi negatiivisesti ja vetää kalvon läpi pääseviä positiivisesti varautuneita vety-ioneita puoleensa, jotka reagoivat kemiallisesti. Kemiallisen reaktion lopputuotteena syntyy vettä ja lämpöä. (Larjola 2008; Le 2003)



Kuva 2.5 PEM (Polymer Electrolyte Membrane)-polttokennon periaate. (Le 2003)

Kuvan 2.5 mukainen PEM-tyypin vetypolttokenno tuottaa noin 0.7 voltin jännitteen. Jotta käytettävälle kuormalle saataisiin korkeampi jännite, tarvitsee vetypolttokennoja olla monta sarjassa. Oikeastaan tällöin voitaisiin puhua vetypolttokennostosta, mutta yleensä vetypolttokennolla tarkoitetaan vetypolttokennostoa. (Le 2003)

PEM-vetypolttokennolla on monia etuja muihin polttokennoihin nähden. Ne ovat kevyitä, niissä ei ole liikkuvia osia ja ne toimivat alhaisilla lämpötiloilla (60 – 80 °), joka mahdollistaa polttokennolle nopean käynnistymisen, aiheuttaa vähemmän vetypolttokennon kulumista ja parantaa sen kestävyyttä ja elinikää. Huonoina puolina voidaan mainita katalyyttinä käytettävää platinaa. Platina on kallista ja lisäksi erittäin arka hiilimonoksidille. Tämän vuoksi PEM-vetypolttokennon sisälle voidaan joutua rakentamaan toinen reaktori. (Automotive 2000)

PEM-vetypolttokennojen sähköinen hyötysuhde on noin 25 – 50 %, riippuen mm. polttokennosta, sen kokoluokasta ja polttokennon toimintalämpötilasta. Myös vetypolttokennoon johdettava ilman happipitoisuus, ja se millä paineella happi syötetään polttokennoon vaikuttaa hyötysuhteeseen. Yleensä vetypolttokennon hyötysuhde jää selvästi alle 50 %:n vetypolttokennoautossa. Realistinen sähköinen hyötysuhde autoissa käytet-

täville vetypolttokennoille onkin noin 40 %. Vetypolttokennolla on kuitenkin kohtuullisen hyvä hyötysuhde osakuormilla. PEM-vetypolttokennolla on myös osoitettu pääsevän 1.35 kW/l tehottiheyteen, mikä vastaa suunnilleen polttomoottoriauton tehottiheyttä. (Ellis 2001; Kara 2004)

Vetypolttokenno tarvitsee varsinaisen polttokennon lisäksi polttoaineen ja hapettimen käsittelyjärjestelmän, erilaisia polttoaineen kierrätys- ja jälkikäsittelylaitteita, jäähdytysjärjestelmän, kostuttimia, käynnistyslaitteita, tehoelektroniikkaa sekä ohjaus- ja säätölaitteita. Yleisiä järjestelmän osia ovat usein reformeri, puhaltimet, lämmönvaihtimet, jälkipolttimet ja neutraalikaasun käsittelylaitteet. Tietysti käytettäessä polttoaineena puhdasta vetyä, ei reformeria ja jälkipoltinta tarvita. Vetypolttokennon tarvitsemat oheislaitteet myös huonontavat vetypolttokennojärjestelmän kokonaishyötysuhdetta, ja ne voivat muodostaa jopa 50 – 70 % vetypolttokennojärjestelmän hinnasta. (Kara 2004)

Prototyypivaiheessa olevan PEM-vetypolttokennovoimalaitteen hinta voi olla yli 10000 €/kW, kun Yhdysvaltain energiaministeriö (U.S. Department of Energy) on asettanut polttokennon tavoitehinnaksi 35 \$/kW. Kymmenkertainen hinta tavoitehinnasta riittäisi vauhdittamaan polttokennojen yleistymistä ja kysyntää. Vetypolttokennoautoissa käytettävien vetypolttokennojen käyttöikä on tällä hetkellä maksimissaan noin 2000 tuntia, lyhyen tähtäimen tavoitteena ollessa, että polttokennot kestäisivät suunnilleen 5000 tuntia. Stationaarisisessa tilassa olevien vetypolttokennojen käyttöikä on nykyään maksimissaan 20000 tuntia, niille asetetun lyhyen tähtäimen kestävyystavoitteen ollessa noin 40000 tuntia. (Ellis 2001; Nylund 2007)

### 3 SÄHKÖ JA VETY AUTON POLTTOAINEENA

Tässä osiossa käsitellään vetyä ja sähköä ajoneuvon polttoaineena. Sähkö ja vety eivät itsessään ole varsinaisesti polttoaineita vaan energian kantajia, ajatellaan niitä silti tässä tapauksessa eräänlaisena polttoaineena vertailun mahdollistamiseksi sekä toisiinsa että bensiiniin ja dieseliin. Osiossa perehdytään autojen käyttämien polttoaineiden valmistukseen, eri polttoainevaihtoehtojen aiheuttamiin hiilidioksidipäästöihin ajoneuvokäytössä ja polttoaineiden logistisiin ketjuihin valmistuksesta lopulliseen käyttökohteeseen. Hiilidioksidipäästöjen ja polttoaineiden logististen ketjujen osalta otetaan myös huomioon fossiiliset polttoaineet, kuten bensiini ja diesel, jotta saadaan vertailukelpoisia tietoja sähköautossa ja nykyisissä polttomootoriautossa käytetyistä polttoaineista.

Sähkö eroaa muista autoissa käytetyistä energianlähteistä hyvin paljon, sillä itse sähköä ei voida varastoida kuten vetyä tai öljypohjaisia polttoaineita. Sähkön varastointi perustuukin sähköenergian muuttamisesta toiseen muotoon, josta se muutetaan tarpeen tullen takaisin sähköenergiaksi. Sähköakkuauton tapauksessa sähköenergia varastoidaan akkuihin kemiallisessa muodossa, josta se muutetaan takaisin sähköenergiaksi. (Berndt 1997)

Sähkö itsessään ei pala, syty tai räjähdä, mutta sähköautoissa käytettävän sähkön jännite ja virta saattavat aiheuttaa vaaratilanteita. Korkea jännite voi aiheuttaa sähköiskun ja jopa sytyttää muita aineita. Tästä syystä sähköautoissa on kiinnitettävä huomiota korkeajännitteisten komponenttien suojaukseen myös mahdollisissa onnettomuustilanteissa. (Nylund 2007)

Vety taas eroaa sähköstä, bensiinistä ja dieselistä hyvin paljon ominaisuuksiltaan. Vety molekyyli koostuu yhdestä elektronista ja protonista. Se on maailmankaikkeuden yksinkertaisin ja yleisin alkuaine. Sitä ei juuri esiinny vapaana luonnontilassa vaan se on aina sitoutuneena eri yhdisteisiin. (Kivinen 1978) Vety molekyyli on erittäin pieni, vuotoherkkä ja syttymiskelpoinen laajalla seossuhdealueella. Vedyn syttymisraja on laaja, sillä vety voi syttyä, mikäli sitä on ilmassa 4 - 75 % tilavuudesta. Vedyn ollessa vuotoherkkä ja karatessa pienistäkin raoista ja jopa kaasusäiliön kuoren läpi, liittyy vetykaasun varastoimiseen ja käyttämiseen riskejä. Riskejä pyritään minimoimaan laatimalla vetykäyttöisille ajoneuvoille tarkat tekniset vaatimukset. Helposti syttyvä bensiini, jon-

ka syttymisraja on 1.4 – 7.6 % ilman tilavuudesta, on syttymiskelpoista huomattavasti pienemmällä seossuhdealueella. Bensiini ei myöskään ole kovin vuotoherkkää. Dieseliä on sen sijaan korkea leimahduspiste, eikä se normaalilämpötiloissa muodosta syttymiskelpoista seosta. (Nylund 2007)

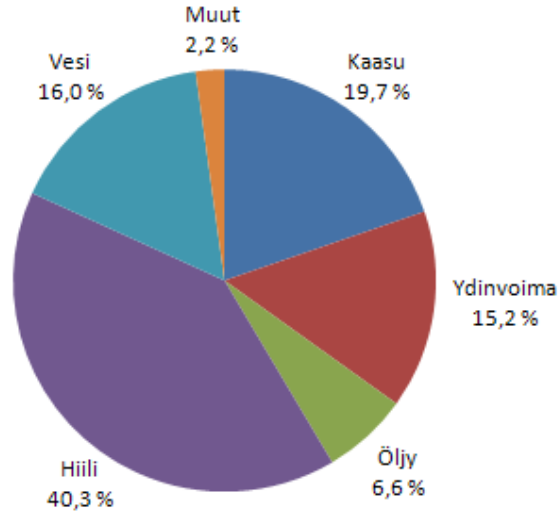
### **3.1 Polttoaineiden ja energiankantajien valmistus**

Sähköautojen käyttämää vetyä ja sähköä voidaan valmistaa monella eri tekniikalla, joilla on omat etunsa ja haittansa. Molempien valmistustekniikoita kehitetään edelleen ja hyötysuhteita yritetään parantaa jatkuvasti. Bensiiniä ja dieseliä jalostetaan raakaöljystä, ja näiden valmistusprosessi on kohtuullisen vakiintunut. Suurin kehityskohde onkin bensiinin ja dieselin ominaisuuksien parantaminen erilaisilla lisäaineilla.

#### *3.1.1 Sähköntuotanto*

Sähköä voidaan tuottaa monilla eri tekniikoilla. Tuotannon hyötysuhteet ja päästöt riippuvat paljon käytettävästä tuotantotekniikasta. Hyötysuhteet riippuvat paitsi käytettävästä tuotantotekniikasta, myös paljon voimalaitoksessa käytettävästä tekniikasta ja sen kunnosta. Voimalaitosten aiheuttamat päästöt ovat myös yksilöllisiä ja niihin vaikuttavat paitsi voimalaitosten tekniikka myös erilaiset paikalliset lainsäädännöt, jotka määrittelevät sallittujen päästöjen määrät. Yleensä fossiilisia polttoaineita käyttävät voimalaitokset päästävät ilmakehään päästöjä, kun taas uusiutuvia energialähteitä käyttävät voimalaitokset, kuten vesivoimalaitokset, eivät aiheuta päästöjä ollenkaan. Myös ydinvoimalaitokset voidaan laskea päästöttömiksi, mutta ne tuottavat radioaktiivista jätettä.

Maailmassa on viisi ylivoimaisesti eniten sähköntuotantoon käytettyä energianlähdettä, jotka ovat vesi, kaasu, hiili, ydinvoima ja öljy. Muita energialähteitä, kuten aurinkoa, tuulta ja jätteenpolttoa käytetään sähköntuotantoon varsin vähän. Kuvassa 3.1 on esitetty eri energialähteiden sähköntuotannon osuudet maailmassa vuonna 2005. (Energia 2009a)



Kuva 3.1 Sähkön tuotanto maailmassa energialähteittäin vuonna 2005. (Energia 2009a)

Energialähteiden hyötysuhteiden erot ovat suuret. Vesivoiman sähköinen hyötysuhde voi olla jopa 90 %, kun lauhdevoimalaitoksilla sähköiseksi hyötysuhteeksi saadaan noin 40 % ja polttomoottorivoimalaitoksilla noin 50 %. Kaasuturbiinivoimalaitoksilla päästään vain 25 – 35 % sähköisiin hyötysuhteisiin. Hyötysuhteissa on kuitenkin muistettava, että monesti voimalaitoksissa voidaan tuottaa sähkön rinnalla myös lämpöä, jolloin voidaan päästä jopa 90 % kokonaishyötysuhteeseen. Pääosa maailman sähkön tuotannosta tuotetaan lauhdevoimalaitoksissa, joten voidaan yleisesti olettaa sähkön tuotannon olevan lauhdevoimalaitoksien hyötysuhde eli 40 %. (Larjola 2006; Partanen 1997)

### 3.1.2 Vedyn tuotanto

Vetyä käsitetään monesti tulevaisuuden päästöttömänä polttoaineena. Vedyn ollessa energiankantaja eikä energialähde, joudutaan vedyn valmistukseen käyttämään jotain toista energialähdettä. Teoriassa helpoin ja yksinkertaisin tapa tuottaa vetyä on veden hajottaminen elektrolyysillä sähkövirran avulla. Huono puoli on, että termodynamiikan lakien mukaan energiamuunnosten hyötysuhde ei voi olla 100 %, eli elektrolyysissä tapahtuu aina häviöitä. Todellisuudessa elektrolyysin hyötysuhde onkin 40 – 80 % ja yleisesti voidaan olettaa hyötysuhteen olevan noin 70 %. Hyvänä puolena vedyn tuotannossa on kohtuullisen helppo tapa tuottaa vetyä päästöttömästi käyttämällä sähkön tuotannon uusiutuvia energialähteitä tai esimerkiksi ydinvoimaa. Vetyä voidaan tuottaa lähes päästöttömästi myös fossiilisista polttoaineista käyttämällä CCS-tekniikkaa (Carbon Capture and Storage) eli hiilidioksidin talteenottotekniikkaa. (Kendall 2008; Nylund

2007) Vetyä valmistetaan myös eri menetelmin reformoimalla sitä eli erottamalla sitä hiilivedyistä, alkoholeista ja muista yhdisteistä. Reformoinnilla voidaan päästä jopa 90 % hyötysuhteisiin. Tällä hetkellä maailman vedyn tuotanto perustuu pääosin maakaasun reformointiin. (Bossel 2005; Nylund 2007)

### *3.1.3 Bensiinin ja dieselin tuotanto*

Bensiiniä ja dieseliä tuotetaan jalostamalla niitä raakaöljystä. Raakaöljy on erilaisten hiilivetyjen seos. Hiilivedyt ovat hiilen ja vedyn kemiallisia yhdisteitä alkaen yhteen hiiliatomiin sitoutuneista neljästä vetyatomista, eli metaanista aina hyvinkin pitkiin molekyyliin, joissa on monia hiiliatomeja peräkkäin ja niihin sitoutuneita vetyatomeja. (Pihkala 2009)

Raakaöljyn jalostus bensiiniksi ja dieseliksi tapahtuu poistamalla raakaöljystä suola ja vesi, jonka jälkeen raakaöljy jaetaan tislamalla jakeiksi. Jakeiden erottelun jälkeen jakeiden kemiallisia rakenteita muutetaan ja niiden jalostusarvoa parannetaan erilaisten reaktioiden avulla. Tämän jälkeen niiden käytettävyyssominaisuuksia parannetaan poistamalla niistä muun muassa rikkiä eri jalostusprosesseissa. Bensiiniä ja dieseliä voidaan jalostaa raakaöljystä hyvällä hyötysuhteella, sillä raakaöljyn sisältämästä energiasta kuuluu bensiinipolttoaineen tuotantoon 12 %. Dieselin tapauksessa lukema on noin 10 %. (Pihkala 2009; Wang 2008)

## **3.2 Polttoaineiden ja energiankantajien logistiset ketjut**

Autoissa käytettävillä polttoaineilla ja energiankantajilla on erilaiset logistiset ketjut tuotantopaikasta autoon. Varsinkin vedyllä on muutamia vaihtoehtoja polttoaineen kuljettamiseen, kun taas sähkönsiirtämiseen ei juuri vaihtoehtoja ole.

### *3.2.1 Sähkönsiirto*

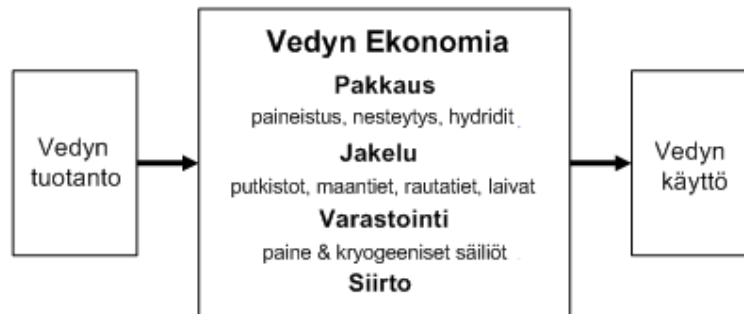
Sähkö siirretään tuotantopaikasta käyttökohteeseen sähköjohtoa pitkin. Kannattavia vaihtoehtoja sähkönsiirtoon ei juuri ole. Sähköä ei voida myöskään käytännössä varastoida sähköisessä muodossa. Sähkönsiirron kapasiteettiin vaikuttavat siirtojohtoon ominaisuudet, jotka ovat mitoitettu siten, että tuotettu sähkö saadaan siirrettyä käyttökohteeseen. Mahdollisia pullonkauloja saattaa syntyä sähköakkuautojen yleistyessä, jolloin



siirrettävä tehomäärä saattaa kasvaa odotettua enemmän ja olemassa olevia sähköjohtoja voidaan joutua vahvistamaan. Suomessa sähkönsiirrossa ja -jakelussa aiheutuvia häviöitä tuotantolaitokselta käyttökohteeseen oli vuonna 2006 noin 4 % (Energia 2009a). Maailmanlaajuisesti taas voidaan olettaa, että enimmäishäviöt ovat 8 % (Kendall 2008). Tässä työssä oletetaan, että sähkönsiirrosta ei aiheudu 6 % suurempia häviöitä.

### 3.2.2 Vedyn logistinen ketju

Vedyn kuljetuksessa ja varastoinnissa omat haasteensa, koska vedyn tiheys on erittäin pieni. Vety tuotetaan tuotantolaitoksessa, josta se täytyy kyetä siirtämään ja varastomaan vetypolttokennoautojen käyttämälle tankkauspiisteelle. Tankkauspiisteeltä vety siirretään vielä vetypolttokennoautojen tankkiin vetypolttokennon käytettäväksi. Kuvassa 3.2 on esitetty vedyn logistinen ketju.



Kuva 3.2 Vedyn logistinen ketju. (Bossel 2005)

Jotta vedyn kuljetuksessa ja siirrossa päästään käytännöllisiin ainemääriin, joudutaan vety joko paineistamaan tai nesteyttämään. Vedyn paineistus vie vähintään noin 10 % vedyn sisältämästä energiasta. Nesteytettäessä menetetään vähintään noin 35 % vedyn sisältämästä energiasta. Vetyä voidaan varastoida ja kuljettaa säiliöissä ja putkissa. Siirrettäessä tai kuljetettaessa vetyä kaasuna putkistoa tai tieverkostoa pitkin tuotantolaitokselta tankkauspiisteelle, menetetään vedyn sisältämästä energiasta 10 %. Mikäli vety kuljetetaan tai siirretään nestemäisenä, ovat häviöt noin 6 %. Tankkauspiisteellä joudutaan vety siirtämään vielä vetypolttokennoauton tankkiin, jolloin siirrossa syntyy vähintään 3 %:n häviöt. (Bossel 2003)

### 3.2.3 *Bensiinin ja dieselin logistiset ketjut*

Bensiinin ja dieselin siirtäminen ja varastointi on helpompaa ja vie vähemmän energiaa kuin esimerkiksi vedyn siirto. Bensiiniä ja dieseliä kuljetetaan öljynjalostamolta huoltoasemille, joista se pumpataan autoissa oleviin tankkeihin. Bensiinin ja dieselin kuljetus ei vaadi paineistusta eikä nesteytystä, sillä bensiini ja diesel ovat nestemäisessä muodossa normaaleissa lämpötiloissa. Bensiini- ja diesel-polttoaineen tuotantoon, jalostukseen ja jakeluun kuluu noin 17 % bensiinin ja dieselin sisältämästä energiasta (US DOE 2000). Bensiinin tuotantoon ja jalostukseen kuluu 12 % bensiinin sisältämästä energiasta ja dieselillä 10 % dieselin sisältämästä energiasta, joten polttoaineiden logististen ketjujen voidaan olettaa aiheuttavan noin 6 %:n häviöt.

## 4 ERI TEKNIKOIDEN HYÖTYSUHTEET JA PÄÄSTÖT

Tässä osiossa tutkitaan sähköakku- ja vetypolttoautojen hyötysuhteita ja päästöjä ajoneuvojen koko elinkaaren osalta. Vertailun vuoksi tarkastellaan myös bensiini- ja dieselajoneuvojen hyötysuhteita ja päästöjä.

### 4.1 Hyötysuhteet

Hyötysuhteet ovat tärkeitä kriteereitä autojen vertailun kannalta. Hyötysuhteet ilmoittavat kuinka paljon alkuperäisestä energiasta saadaan muutettua halutuksi energiamuodoksi, eli tässä tapauksessa auton liike-energiaksi. Eri autotekniikoiden vertailussa, on otettava huomioon niiden käyttämien polttoaineiden ja energiankantajien koko elinkaari. Öljynporauksesta tai tuulivoimalan rakentamisesta aiheutuneita energian menetyksiä ei kuitenkaan ole mielekästä ottaa huomioon, vaan elinkaaren tarkastelu aloitetaan voimalaitoksen hankkimasta energialähteestä. Käytettyä periaatetta kutsutaan monesti PTW (plant-to-wheel) -periaatteeksi. Hyötysuhteiden tarkastelussa huomioidaan myös vedyn ja sähkön tapauksessa mahdollisten uusiutuvien energialähteiden käyttö. Uusiutuvia energialähteitä käyttävien voimaloiden hyötysuhde ei ole 100 %, mutta ne ovat käytännössä loputtomia energiavaroja ja eräässä mielessä ilmaista energiaa. Uusiutuvia energialähteitä käytettäessä ei jouduta käyttämään mahdollisesti aikanaan loppuvia fossiilisia polttoaineita. Tästä syystä hyötysuhteen oletetaan olevan 100 %.

#### 4.1.1 Sähköakkuauton kokonaishyötysuhde

Sähköakkuauton käyttämän energian hyötysuhdetta tarkastellaan kahdella eri skenaariolla. Ensimmäisessä skenaariossa oletetaan, että kaikki sähköakkuauton kuluttama sähkö tuotetaan uusiutuvilla energialähteillä, joiden hyötysuhteiksi lasketaan 100 %, sillä uusiutuvien energialähteiden käytössä ei jouduta kuluttamaan polttoaineita. Toisessa skenaariossa oletetaan, että tarvittava sähkö tuotetaan nykyisellä sähköntuotantorakenteella tai käyttämällä sähköntuotannon polttoaineena bensiiniä ja dieseliä. Molemmissa tapauksissa hyötysuhteeksi saadaan noin 40 %.

Sähköakkuauton kuluttaman energian elinkaari alkaa sähköntuotannosta. Sähköntuotannon hyötysuhde on 40 – 100 %, riippuen mistä ja miten sähkö on tuotettu. Tuotettu sähkö tarvitsee siirtää kuluttajalle, ja sähkönsiirrossa ja jakelussa oletetaan syntyvän 6

%:n häviöt. Kuluttajalle siirretty sähkö varataan akkuvaraajalla akkuun, jonka hyötysuhde on noin 92 % (Bossel 2003). Akun purkautumisessa ja varautumisessa syntyy häviöitä, ja akkujen hyötysuhteet ovat 65 – 90 %. Auton voimansiirron häviöt koostuvat mm. sähkömoottorissa ja taajuusmuuttajissa tapahtuvista häviöistä. Voimansiirrosta tapahtuvat häviöt ovat noin 10 % (Bossel 2003). Sähköautoissa käytettyä sähkömoottoria pystytään käyttämään myös generaattorina. Tällöin jarrutuksen aikana voidaan ottaa talteen jarrutuksessa syntyvää energiaa. Hyötysuhteessa on otettu huomioon tämä sähkömoottorin regeneroima sähkö, joka on noin 10 % auton käyttämästä energiasta (Bossel 2003).

Taulukossa 4.1 on esitetty elinkaaren aikana syntyvät häviöt kahden eri skenaarion mukaan. Lopuksi on laskettu käytetyn energian hyötysuhde koko elinkaaren ajalta. Hyötysuhteiden laskentaesimerkki on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 4.1 Sähköakkuauton kokonaishyötysuhde.

Tapahtuma	Hyötysuhde 1 [%]	Hyötysuhde 2 [%]
	(Uusiutuvat energialähteet)	(Nykyinen rakenne)
<b>Sähköntuotanto</b>	100	40
<b>Sähkönsiirto ja jakelu</b>	94	94
<b>Akun laturin hyötysuhde</b>	92	92
<b>Akun hyötysuhde</b>	65 - 90	65 - 90
<b>Sähköiset häviöt voimansiirrosta</b>	90	90
<b>Jarrutusenergian talteenotto</b>	110	110
<b>Sähköakkuauton kokonaishyötysuhde</b>	56 - 77	22 - 31

Tarkasteltaessa taulukkoa 4.1 on muistettava, että käytetyt hyötysuhteet ovat päteviä vain tietyissä olosuhteissa. Varsinkin akkujen hyötysuhde saattaa muuttua, mikäli akkuja käytetään kylmässä ilmastossa. Nykyään trendinä on valmistaa sähköakkuauton akusto litium-ioni-akuista, joten hyötysuhteita tarkasteltaessa voidaan käyttää akun hyötysuhteina 90 % ja kokonaishyötysuhteina ilmoitetuista hyötysuhteista korkeampia eli 77 % ja 31 %. Myös muut arvot saattavat vaihdella esimerkiksi akkuvaraajassa ja sähköakkuautossa käytettyjen komponenttien laadun ja tekniikan vuoksi.

#### 4.1.2 *Vetypolttokennoauton kokonaishyötysuhde*

Vetyä voidaan tuottaa elektrolyysillä vedestä, mutta käytetyin keino on edelleen vedyn reformointi jostakin hiilivedystä. Elektrolyysissä vetyä erotetaan vedestä sähkövirran avulla, ja tarvittava sähkö voidaan tuottaa esimerkiksi uusiutuvista energialähteistä. Vetypolttokennoauton hyötysuhdetta tarkastellaankin tästä syystä kolmen eri skenaarion avulla. Ensimmäisessä skenaariossa oletetaan, että elektrolyysissä tarvittava sähköenergia on tuotettu puhtaasti uusiutuvista energialähteistä ja hyötysuhde on 100 %. Toisessa skenaariossa oletetaan sähköntuotannon olevan maailmassa vallitsevan tilan mukainen, eli sähköinen hyötysuhde on 40 %. Kolmannessa skenaariossa tarkastellaan hyötysuhdetta siten, että vety tuotetaan reformoimalla sitä jostakin hiilivedystä. Reformoimalla vetyä maakaasusta, kuten pääosin vedyn valmistusmenetelmänä käytetään, voidaan päästä jopa 90 % hyötysuhteeseen.

Vedyn kuljetusta ja jakelua varten vety paineistetaan, johon kuluu energiaa vähintään noin 10 % sen energiasisällöstä. Vety voidaan myös nesteyttää, jolloin kuljetuksen ja jakelun hyötysuhde paranee, mutta vastaavasti nesteyttämiseen kuluisi enemmän energiaa kuin paineistamiseen. Vedyn nesteyttämiseen liittyvien ongelmien vuoksi, ei tässä osiossa lasketa erikseen hyötysuhdetta nesteytettynä kuljetetulle vedylle. Paineistetun vedyn kuljetus ja jakelu aiheuttavat noin 10 %:n häviöt. Myös vedyn siirto jakelupisteeltä autoon aiheuttaa noin 3 %:n häviöt, sillä vety joudutaan jakelupisteellä paineistamaan polttokennoautossa käytettävään vielä suurempaan paineeseen.

Vetypolttokennon hyötysuhteena käytetään 40 %. Vetypolttokennon vaatimien lisälaitteiden aiheuttamat lisähäviöt ovat 10 % (Bossel 2003). Koska vetypolttokennoauto ei autossa tuotetun sähköän jälkeen juuri eroa sähköakkuautosta, käytetään sähköisiin häviöihin voimansiirrossa ja jarrutusenergian talteenotossa samoja hyötysuhteita kuin sähköakkuautossa. Taulukossa 4.2 on koottu vetypolttokennoauton käyttämän energian elinkaaren hyötysuhteet, ja laskettu koko elinkaaren hyötysuhde kolmeen eri skenaarioon perustuen. Laskentaesimerkki hyötysuhteiden laskemiseksi löytyy liitteestä 1.

Taulukko 4.2 Vetypolttokennoauton kokonaishyötysuhde.

Tapahtuma	Hyötysuhde 1 [%]	Hyötysuhde 2 [%]	Hyötysuhde 3 [%]
	(Uusiutuvat energia- lähteet)	(Nykyinen sähköntuo- tannon rakenne)	(Reformointi maakaasusta)
<b>Sähköntuotanto</b>	100	40	-
<b>Vedyn tuotanto reformoimalla</b>	-	-	90
<b>Vedyn tuotanto elektrolyysillä</b>	70	70	-
<b>Vedyn paineistaminen</b>	90	90	90
<b>Vedyn kuljetus ja jakelu</b>	90	90	90
<b>Vedyn siirto (auton säiliöön)</b>	97	97	97
<b>Vetypolttokennon hyötysuhde</b>	40	40	40
<b>Vetypolttokennon loishäviöt</b>	90	90	90
<b>Sähköiset häviöt voimansiirrossa</b>	90	90	90
<b>Jarrutusenergian talteenotto</b>	110	110	110
<b>Vetypolttokennoauton kokonaishyötysuhde</b>	20	8	25

Taulukon 4.2 tuloksista huomataan, ovat kokonaishyötysuhteiden erot hyvin suuria (8 % – 25 %). Vetyauton kannattavuutta tarkasteltaessa onkin otettava huomioon tapa, jolla vety tuotetaan. Taulukon 4.2 tuloksia tarkasteltaessa on myös huomioitava, että vetypolttokennoautossa ei välttämättä ole suurta akustoa, johon voidaan varata kaikki jarrutuksessa syntyvä energia. Tällöin jarrutusenergian talteenotto prosentti huononee tai poistuu kokonaan, mikä vaikuttaa myös kokonaishyötysuhteeseen.

#### 4.1.3 Polttomoottoriauton kokonaishyötysuhteet

Nykyisissä polttomoottoriautoissa käytettyjen polttoaineiden osalta on hyötysuhteita tarkasteltaessa otettava huomioon myös niiden valmistuksessa kulutettu energia. Bensiiniä ja dieseliä valmistetaan tislamalla sitä raaka-öljystä. Valmistettu bensiini ja diesel siirretään jakeluasemille, josta se pumpataan autossa olevaan tankkiin. Nämä operaatiot kuluttavat noin 17 % polttoaineiden sisältämästä energiasta (US DOE 2000).

Nykyisten polttomoottoriautojen enimmäishyötysuhteet vaihtelevat 28 %:sta 33 %:iin, riippuen käytetystä polttoaineesta. Polttomoottoreita ajetaan kuitenkin erittäin harvoin niiden optimaalisella hyötysuhteella, joka tarkoittaa, että käytännössä polttomoottorin hyötysuhteet ovat paljon pienempiä. Dieselmoottorin hyötysuhde henkilöajoneuvossa onkin vain suunnilleen 30 % ja bensiinimoottorin 23 %. (Kendall 2008)

Polttomoottoriauton voimansiirrossa tapahtuu suuria häviöitä vaihteiston, hammaspyörien ja monien muiden pyörivien osien takia. Polttomoottoriauton voimansiirrossa tapahtuvien häviöiden mittaaminen on hankalaa, sillä moottorin tuottamaa tehoa ei tunnetta hyvin. Myös mittauksen aikana vaikuttava kuormitus ja lämpötila vaikuttavat syntyviin häviöihin. Voimansiirron häviöiden voidaan arvioida olevan noin 18 %. (Juhala 2009)

Tyypillisissä polttomoottoriautoissa moottori on käynnissä suoritettavan matkan ajan. Auton ollessa pysähdyksissä liikennevaloissa ja -ruuhkissa polttomoottori käy tyhjäkäynnillä. Moottorin tyhjäkäynnistä aiheutuu noin 5 – 10 %:n ylimääräiset häviöt (Vaclav 2006). Kyseisiä häviöitä ei kuitenkaan oteta huomioon tämän työn kokonaishyötysuhdelaskelmissa, sillä tyhjäkäynnistä johtuvat häviöt ovat kohtuullisen helposti vähennettävissä ja riippuvat hyvin suuresti tyhjäkäynnin osuudesta käyntiaikaan.

Taulukossa 4.3 on esitetty sekä dieselmoottorin että bensiinimoottorin koko elinkaaren hyötysuhteet. Lopuksi on laskettu millä hyötysuhteella saadaan alkuperäinen energiamäärä muutettua liike-energiaksi. Esimerkkilaskelma hyötysuhteen laskemisesta löytyy liitteestä 1.

Taulukko 4.3 Bensiini- ja dieselauton kokonaishyötysuhteet.

<b>Tapahtuma</b>	<b>Hyötysuhde (Diesel) [%]</b>	<b>Hyötysuhde (Bensiini) [%]</b>
<b>Polttoaineen tuotanto</b>	90	88
<b>Polttoaineen kuljetus ja jakelu</b>	94	94
<b>Polttomoottori</b>	30	23
<b>Voimansiirron hyötysuhde</b>	82	82
<b>Polttomoottoriauton kokonaishyötysuhde</b>	21	16

Taulukosta 4.3 huomataan, että dieselmoottorilla päästään hieman parempaan hyötysuhteeseen kuin bensiinimoottorilla. Molempien moottorien ja voimansiirron hyötysuhteita voidaan kasvattaa hieman käyttämällä parempia komponentteja. Tämä on kuitenkin kallista eikä kasvata hyötysuhteita paljoa.

## 4.2 Polttoaineiden ja energiantantajien aiheuttamat hiilidioksidipäästöt

Eri tekniikoiden hyötysuhteiden lisäksi eri tekniikoiden käytöstä aiheutuvat päästöt ovat huomionarvoisia. Sähköakkuauto ja vetypolttokennoauto eivät käytännössä aiheuta paikallisia päästöjä, mutta päästöjä tarkasteltaessa on syytä ottaa huomioon koko energiaketju. Polttomoottoriautot aiheuttavat päästöjä myös paikallisesti, mutta niiden päästämiensä paikallisten päästöjen lisäksi on myös huomioitava päästöt koko energiaketjun osalta. Tuotantolaitoksien rakentamisessa, polttoaineen hankkimisessa ja itse ajoneuvon valmistamisessa syntyneitä päästöjä ei kuitenkaan oteta huomioon, vaan elinkaari aloitetaan samasta pisteestä kuin hyötysuhteita laskettaessa.

Varsinkin polttomoottoreissa syntyy muitakin kuin hiilidioksidipäästöjä, mutta tässä työssä ei paneuduta niihin siksi, että kaikkien päästöjen määrittäminen on erittäin ongelmallista niiden ollessa hyvin riippuvaisia monesta tekijästä. Aiheutuneet päästöt riippuvat mm. käytetystä energiantuotantotavasta, tuotantolaitosten ja autojen suodatusjärjestelmistä, eri maissa vaikuttavista laeista ja polttoaineissa käytetyistä lisäaineista.

Eri tekniikoiden aiheuttamien päästöjen vertailun mahdollistamiseksi, on otettava huomioon eri tekniikoiden hyötysuhteet ja pääasiassa käytetty energiantuotantotapa. Varsinkin sähköenergian tapauksessa, joka voidaan tuottaa kokonaan hiilidioksidipäästöttömästi mm. uusiutuvista energialähteistä, pitää sähköakkuauton tapauksessa käyttää päästöjen laskemiseen kahta metodologiaa. Toisessa oletetaan sähköntuotannon perustuvan hiilidioksidipäästöttömään tuotantoon ja toisessa nykyisen sähköntuotannon rakentamiseen. Myös vetypolttokennoautossa huomioidaan mahdollisuus tuottaa vetyä päästöttömästi tuotetun sähköän avulla elektrolyysillä. Vallitsevaan sähköntuotannon rakentamiseen perustuvat sähköakkuauton ja vetypolttokennoauton päästöt lasketaan kertomalla niiden hyötysuhteet sähköntuotannossa syntyvillä hiilidioksidipäästöillä. Bensiini- ja dieselpolttoaineiden hiilidioksidipäästöt lasketaan kertomalla bensiinin ja dieselin poltosta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt niiden hyötysuhteilla. Näin päästään vertailukelpoisiin arvoihin, joissa hiilidioksidipäästöt on suhteutettu autossa muuttuvaksi liikeenergiaksi.

Maailman sähköntuotannon aiheuttamat hiilidioksidipäästöt voidaan olettaa olevan noin 446 CO<sub>2</sub> g/kWh (WWF 2009), kun esimerkiksi vuonna 2008 Suomessa tuotetun sähköän aiheuttamat hiilidioksidipäästöt olivat 168 CO<sub>2</sub> g/kWh (Energia 2009b). Bensiinin ja



dieselin poltosta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt lasketaan ominaispäästökertoimilla 261 CO<sub>2</sub> g/kWh bensiinillä ja 265 CO<sub>2</sub> g/kWh dieselillä (Silvonen 2006). Näihin lukuihin ei ole otettu huomioon valmistuksesta ja jakelusta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä. Reformoitaessa vetyä maakaasusta, joka on nykyisin käytetyin tapa vedyn tuotannossa, syntyy päästöjä noin 370 CO<sub>2</sub> g/kWh (Altmann 2005).

Sähköajoneuvojen tuottamat kokonaishiilidioksidipäästöt suhteessa akselilla tehtävään työhön [CO<sub>2</sub> g/kWh<sub>akseli</sub>] lasketaan jakamalla energiantuotannosta aiheutuneet hiilidioksidipäästöt autojen hyötysuhteella. Tällöin on kuitenkin muistettava, että ei voida suoraan käyttää autojen kokonaishyötysuhteita, vaan on otettava huomioon pelkästään tuotantolaitosten jälkeen syntyvät häviöt. Tämä johtuu siitä, että ilmoitetuissa sähköntuotannon aiheuttamissa hiilidioksidipäästöissä on jo huomioitu tuotantolaitosten hyötysuhteet. Bensiini- ja dieselajoneuvoille käytetään polttoaineen hiilidioksidipäästökerronta. Tästä syystä polttomoottoritekniikoilla on otettava myös valmistuksessa syntyvät päästöt huomioon. Käytettävät hyötysuhteet ovatkin tässä tapauksessa taulukon 4.4 mukaiset.

Taulukko 4.4 Eri autotekniikoiden aiheuttamat hiilidioksidipäästöt

Ajoneuvon tekniikka	Käytetty energialähde	Energialähteen CO <sub>2</sub> -päästöt [CO <sub>2</sub> g/kWh]	Ajoneuvon hyötysuhde [%]	Kokonaishiilidioksidipäästöt [CO <sub>2</sub> g/kWh <sub>akseli</sub> ]
<b>Sähköakkuauto</b>	Nykyinen sähkön-tuotannon rakenne	446	77	580
	Uusiutuvat energialähteet	0	77	0
<b>Vetypolttokennoauto</b>	Nykyinen sähkön-tuotannon rakenne	446	20	2230
	Uusiutuvat energialähteet	0	20	0
	Reformointi maakaasusta	370	28	1320
<b>Bensiinimoottori</b>	Jalostus öljystä	261	16	1630
<b>Dieselmoottori</b>	Jalostus öljystä	265	21	1260

Taulukosta 4.4 nähdään, että sähköakkuauton kokonaishiilidioksidipäästöt ovat selvästi alhaisimmat. Vetypolttokennoautolla on kohtuullisen suuret kokonaishiilidioksidipäästöt, mutta on muistettava, että vetypolttokennoauto ei tuota paikallisia päästöjä ollen-

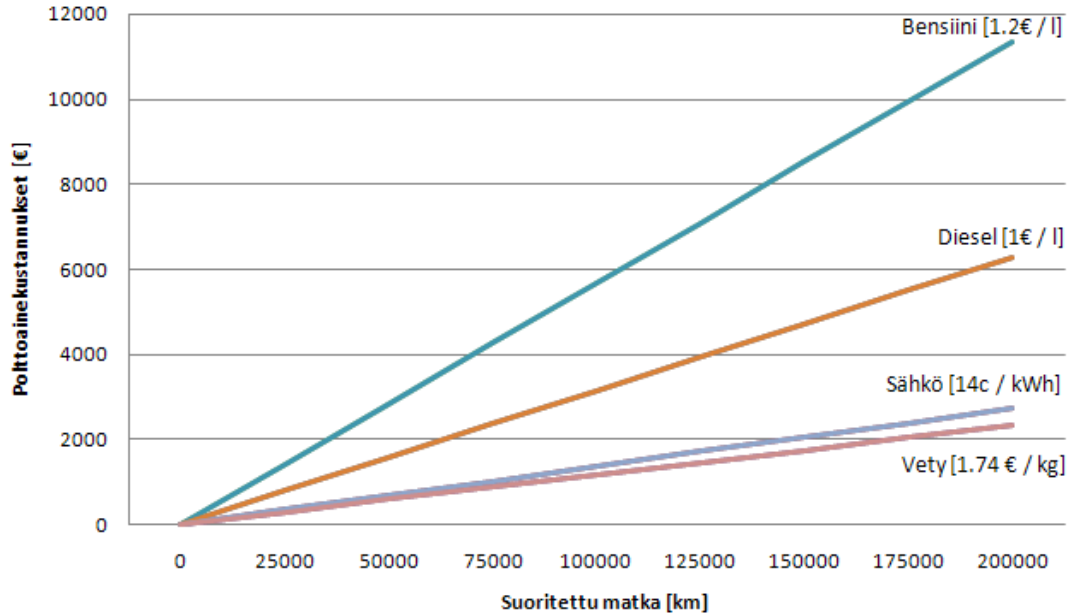
kaan. Myös hiilidioksidin vähentäminen sähköautojen tapauksessa on helpompaa suuressa voimalaitosmittakaavassa kuin yksittäisessä autossa.

## 5 SÄHKÖAUTOJEN MARKKINAT JA YLEISTYMINEN

Maailman seurattessa tarkemmin ihmisen aiheuttamien kasvihuonekaasujen vaikutusta maapallon lämpenemiseen, on kiinnitetty entistä enemmän huomiota vaihtoehtoisiin polttoaineisiin. Myös raakaöljyn rajut hinnanvaihtelut ja kallistuminen ovat lisänneet vaihtoehtoisten polttoaineiden kiinnostavuutta. Sähköakku- ja vetypolttokennoautoilla korvataan perinteisiä bensiini- ja dieselmootoreita pyrkimyksenä vähentää sekä kasvihuonekaasujen että muiden myrkyllisten kaasujen muodostumista. Samalla on pyritty pääsemään eroon suuresta öljyriippuvuudesta. Vaihtoehtoisia polttoaineita käyttäville ajoneuvoille riittää varmasti kysyntää alueilla, joissa autokanta on suuri.

Sähköakku- ja vetypolttokennoautojen yleistyminen on mahdollista, kun näiden autotekniikoiden luotettavuus ja hinnat alkavat vastata bensiini- ja dieselautojen luotettavuutta ja hintoja. Myös uusille tekniikoille tarvittavan infrastruktuurin on oltava tarpeeksi laaja, jotta uusia tekniikoita käyttäviä ajoneuvoja pystytään täysipainotteisesti hyödyntämään. Varsinkin vetypolttokennoautojen yleistyminen on hyvin riippuvainen rakennettavista vedyntäyttöasemista. Toisin kuin sähköakkuautoilla, vetypolttokennoautoilla ei ole mahdollisuutta hyödyntää ”polttoaineen” jakelussa olemassa olevaa verkostoa. Sähköakkuautoilla taas on mahdollisuus hyödyntää jo rakennettua sähköverkkoa niiden akkujen varaamiseen.

Suurin uusien tekniikoiden yleistymiseen vaikuttava tekijä on varmasti hinta. Mikäli hinta on houkutteleva, kasvaa kiinnostus uusiin autotekniikoihin, ja sen myötä vahvistuu tarvittava infrastruktuuri autojen ympärillä. Sähkö- ja vetypolttokennoajoneuvoilla hyötysuhteet ovat paremmat kuin polttomoottorisovelluksilla, joten se vähentää ajoneuvon elinkaaren aikana syntyviä kustannuksia. Kuvassa 5.1 on esitetty eri ajoneuvotekniikoiden elinkaaren aikana syntyviä polttoainekustannuksia ja niiden eroja. Eri ajoneuvotekniikat on suhteutettu toisiinsa arvioimalla kaikkien kulutukseksi 8 kWh / 100 km ja ottamalla niiden hyötysuhteet huomioon. Hyötysuhteet lasketaan polttoaineen täytöstä tai verkosta otetun sähkön jälkeen syntyvistä häviöistä, eli tässä tapauksessa hyötysuhteet ovat sähköakkuautolle 82 %, vetypolttokennoautolle 36 %, dieselautolle 25 % ja bensiiniautolle 19 %. Polttoaineiden hinnat ovat Suomen hintatasoa, niiden ei oleteta muuttuvan eikä rahan arvonalentumista oteta huomioon. Laskentaesimerkki hyötysuhteista löytyy liitteestä 1 ja kustannuksista liitteestä 2.



Kuva 5.1 Eri polttoaineilla syntyvät polttoainekustannukset suoritettun ajomatkan funktiona. 1) Pk-seudun polttoaineiden hinnat. Polttoaine.net. 2009, 2) Sähkön hintavertailu. Energiamarkkinavirasto. www.sähköhint.fi. 2009, 3) Suikkanen Pekka. Puhelinhaastattelu. Oy Woikoski Ab. 2009

Kuvasta 5.1 huomataan, että bensiini- ja dieselkäyttöisten autojen polttoainekulut ovat huomattavat verrattuna sähkö- ja vetykäyttöisiin. On kuitenkin huomioitava, että kuvan 5.1 mukaiset hinnat eivät päde kaikissa valtioissa, sillä ajoneuvojen polttoaineiden hinnoissa on huomattavia eroja. Polttoaineiden hintojen ollessa suhteessa kuvan 5.1 mukaiset, huomataan sähkö- ja vetyajoneuvoilla saavutettavat kustannussäästöt. Polttoainekulujen ollessa pienemmät, voivat polttomoottoriajoneuvojen hinnat olla vastaavasti suuremmat kokonaiskustannuksien kuitenkin kohoamatta.

Ennen sähköakku- ja vetypolttokennoauton yleistymistä nähdään markkinoilla todennäköisesti niin kutsuttuja plug-in-hybridejä. Nämä ovat ajoneuvoja, joissa on polttomoottorin lisäksi sähkömoottori ja sähköakkuautoon verrattuna pienempi akusto. Plug-in-hybrideillä pidemmät matkat suoritetaan polttomoottorin avulla, mutta lyhyemmät ajomatkat voidaan suorittaa pelkästään sähkömoottoria käyttäen. Plug-in-hybridien yleistymisen vauhdittaisi samalla myös sähköakkuauton yleistymistä plug-in-hybridien ja sähköakkuauton käyttämien samojen tekniikoiden vuoksi.

## 6 YHTEENVETO

Sähköakku- ja vetypolttokennoautot ovat erittäin varteenotettavia vaihtoehtoja polttomoottoritekniikan korvaajiksi. Kyseisten sähköautojen etuina ovat autojen hyvät hyötysuhteet, jarrutusenergian talteenotto, valinnanvara energialähteissä, paikallinen päästöttömyys ja mahdollisuus tuottaa autoille energiaa päästöttömästi. Saasteita ja päästöjä voidaan myös vähentää suoraan voimalaitoksissa, joka on tehokkaampaa ja halvempaa kuin jokaisessa autossa erikseen. Uudet tekniikat vaativat silti kehittelyä ja panostusta infrastruktuurien rakentamiseen, jotta sähköautojen yleistyminen alkaisi todenteolla.

Sähköakkuauto on tekniikaltaan valmis. Se on hiljainen ja miltei huoltovapaa sähköauto. Sähköakkuauton hyötysuhde on erittäin korkea (82 %), kuten sen käyttämän energian koko elinkaaren hyötysuhde (77 %) tuottaessa sähkö uusiutuvilla luonnonvaroilla. Käytettäessä nykyistä sähköntuotannon rakennetta laskee sähköakkuauton hyötysuhde 31 %:iin, joka on silti korkea muihin tekniikoihin verrattuna. Sähkönjakelu sähköakkuautoille on ainakin teollisuusmaissa kohtuullisen helppoa ja halpaa rakentaa, sillä käytössä oleva sähköverkko soveltuu pääosin myös sähköakkuautojen tarpeeseen. Sähköakkuauto ei aiheuta paikallisia päästöjä, ja uusiutuvia luonnonvaroja käyttämällä saadaan sähköakkuautosta täysin päästötön. Käytettäessä nykyistä sähköntuotannon rakennetta putoavat sähköakkuautojen hiilidioksidipäästöt käytetyn energian elinkaaren tarkastelussa puoleen dieselautojen aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä. Sähköakkuauton pienillä polttoainekustannuksilla saatetaan saada kuluttajalle jopa 10 000 euron säästöt auton elinkaaren aikana. Ongelmana sähköakkuautoissa ovat akustot, jotka ovat kalliita ja joiden energiatiheudet eivät vielä vastaa tavoitteita. Myös niiden toiminta kylmässä ilmastossa on epävarmaa. Kun nämä ongelmat selviävät, ei sähköakkuauton yleistymiselle ole käytännön esteitä.

Vetypolttokennoauto on hiljainen, mutta ei todennäköisesti aivan yhtä huoltovapaa kuin sähköakkuauto. Vetypolttokennoauton hyötysuhde on hieman dieselautoa parempi. Auton käyttämän energian elinkaaren hyötysuhdetarkastelussa vetypolttokennoauto (8 %) ei pärjää bensiini- ja dieselautoille, mikäli sen tarvitsema vety tuotetaan elektrolyysillä nykyisellä sähköntuotannon rakenteella. Käytettäessä uusiutuvia energialähteitä elektrolyysiin päästään dieselautojen tasolle, mutta reformoitaessa vety esimerkiksi maakaasusta hyötysuhde nousee hieman dieselautoa paremmaksi 28 %:iin. Vetypolttokennoau-

tot saattavat käytetyn energian elinkaaren tarkastelussa tuottaa jopa enemmän hiilidioksidipäästöjä kuin diesel- ja bensiiniautot, mutta ne eivät kuitenkaan tuota paikallisia päästöjä, joka antaa mahdollisuuden päästöjen keskitettyyn vähentämiseen ja uusiutuvi- en luonnonvarojen käyttöön. Polttoainekustannukset ovat Suomessa sähköakkuauton tasoa olettaen, että hinnat pysyvät vakaina. Vetypolttokennoautojen suurimmat ongelmat ovat niiden kokonaishyötysuhteen lisäksi, vetypolttokennojen kestävyys ja hinta. Vedyn kuljetus- ja siirtokustannukset, sekä puuttuva jakeluketju ovat myös suuria ongelma-kohtia vetypolttokennojen yleistymistä ajatellen.

Sähköakku- ja vetypolttokennoautojen läpimurto riippuu paljon paitsi teknisistä seikoista, myös halusta. Käytettäessä kehitystyöhön enemmän voimavaroja ja tukemalla sähköautoilua saadaan polttomoottoritekniikat syrjäytettyä ainakin kaupunkiliikenteestä nopeasti. Sähköautoihin liittyy kuitenkin myös paljon epävarmuuksia, sillä niitä ei juuri ole ollut saatavilla, eikä niistä sen vuoksi ole saatu paljoa käytännön kokemusta. Tarvittavia jatkotutkimuksia onkin tarpeen tehdä viimeistään ensimmäisten sähköautojen ilmestyttyä markkinoille. Asiaa on tutkittava myös maakohtaisesti, sillä sähköakku- ja vetypolttokennoautot soveltuvat eri maihin eri tavalla.

Tässä työssä saadut tulokset ovat pääosin yhteneväisiä alan kirjallisuuden kanssa. Eroavaisuudet johtuvat pääasiassa käytetyistä arvoista, sillä varmoja mittauksista saatuja tietoja on sähköautoista vain vähän johtuen niiden pienistä valmistusmääristä. Tämän työn tuloksia voidaan silti käyttää ohjenuorana tutkittaessa ja analysoitaessa sähköakku- ja vetypolttokennoautojen hyötyjä ja haittoja.

## LÄHDELUETTELO

- (Altmann 2005) Altmann Matthias. Hydrogen: Yes, it's a Solution. 2005. L-B-Systemtechnik GmbH. Saatavissa: [www.lbst.de/publications/presentations2005/Matthias-Altmann\\_EU-Greens-climate-workshop\\_07NOV2005.pdf](http://www.lbst.de/publications/presentations2005/Matthias-Altmann_EU-Greens-climate-workshop_07NOV2005.pdf)
- (Automotive 2000) Automotive Engineering; International Online - Tech Brief. 2000. Viitattu: 9.12.2008. Saatavissa: [www.sae.org/automag/techbriefs\\_09-00/02.htm](http://www.sae.org/automag/techbriefs_09-00/02.htm)
- (Berdichevsky 2006) Berdichevsky Gene, Kelty Kurt, Straubel JB, Toomre Erik. The Tesla Roadster Battery System. 2006. Tesla Motors. Viitattu: 19.01.2009. Saatavissa: [http://www.teslamotors.com/display\\_data/TeslaRoadsterBatterySystem.pdf](http://www.teslamotors.com/display_data/TeslaRoadsterBatterySystem.pdf)
- (Berndt 1997) Berndt Dietrich. Maintenance-Free Batteries, A Handbook of Battery Technology. England 1997. Research Study Press Ltd. 496 s. ISBN 0-86380-198-6
- (Bossel 2003) Bossel Ulf. Efficiency Of Hydrogen Fuel Cell, Diesel-SOFC-Hybrid and Battery Electric Vehicle. Oberrohrdorf 2003. European Fuel Cell Forum. Saatavissa: <http://www.efcf.com/reports/E04.pdf>
- (Bossel 2005) Bossel Ulf, Eliasson Baldur, Taylor Gordon. The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak? – updated version. 2005. European Fuel Cell Forum. Saatavissa: <http://www.efcf.com/reports/E08.pdf>
- (CEC 2007) Full Fuel Cycle Assessment Well to Tank Energy Inputs, Emissions and Water Impacts – Consultant Report. 2007.

- California Energy Commission. CEC-600-2007-002-D Saatavissa: <http://www.energy.ca.gov/2007publications/CEC-600-2007-002/CEC-600-2007-002-D.PDF>
- (Ellis 2001) Ellis Michael W., Von Spakovsky Michael R., Nelson Douglas J. Fuel Cell Systems: Efficient, Flexible Energy Conversion for the 21st Century. 2001. The Institute of Electrical and Electronics Engineering Inc. s.1808–1818. ISSN 0018–9219
- (Energia 2009a) Energiateollisuus ry. Tietopaketti ilmastonmuutoksesta. Viitattu: 21.01.2009. Saatavissa: [www.energia.fi/content/root%2520content/energiateollisuus/fi/ymp%C3%A4rist%C3%B6%2520ja%2520energians%C3%A4%C3%A4st%C3%B6/ilmastonmuutos/liitteet/tietopakettiilmastonmuutoksestappt.ppt](http://www.energia.fi/content/root%2520content/energiateollisuus/fi/ymp%C3%A4rist%C3%B6%2520ja%2520energians%C3%A4%C3%A4st%C3%B6/ilmastonmuutos/liitteet/tietopakettiilmastonmuutoksestappt.ppt)
- (Energia 2009b) Energiateollisuus ry. Energiavuosi 2008, Sähkö. Viitattu: 26.02.2009. Saatavissa: <http://www.energia.fi/fi/ajankohtaista/lehdistotiedotteet/energiavuosi%202008%20s%C3%A4hk%C3%B6.html>
- (He 2008) He Hong-wen, Gao Jian-Ping, Zhang Ya-ming. Fuel Cell Output Power-oriented for a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle. The Institute of Electrical and Electronics Engineering Inc. ISSN 978-1-4244-2079-7
- (Hämeenoja 1993) Hämeenoja Eeva. Akkuopas. Tampere 1993. Kirjapaino Öhrling. 76 s. ISBN 951-96508-3-0
- (Jones 2007) Jones Chris. EV Battery Comparison Overview. 2007. North Bay Electric Auto Association. 51 s. Saatavissa: [http://www.nbeaa.org/new\\_jan\\_07/batteries.pdf](http://www.nbeaa.org/new_jan_07/batteries.pdf)



- (Joshi 2006) Joshi R.P. Deshmukh, A.P. Hybrid Electric Vehicles: The Next Generation Automobile Revolution. 2006. The Institute of Electrical and Electronics Engineering Inc. s.1-6. ISSN 0-7803-9794-0
- (Juhala 2009) Juhala Matti. Kuljetusvälinetekniikan perusteet - kurssimateriaali. 2009. Teknillinen Korkeakoulu. Viitattu: 23.01.2009. Saatavissa: [http://www.tkk.fi/Yksikot/Laiva/Opinnot/Kurssit/Kul-24.3000/pdf/KVTP\\_Maakuljetusvalineet.pdf](http://www.tkk.fi/Yksikot/Laiva/Opinnot/Kurssit/Kul-24.3000/pdf/KVTP_Maakuljetusvalineet.pdf)
- (Kara 2004) Kara Mikko, Helynen Satu, Mattila Lasse, Viinikainen Seppo, Ohlström Mikael, Lahnalampi-Vesivalo Milka, Hongisto Mikko, Ruska Maija, Savolainen Ilkka, Syri Sanna, Vuori Seppo, Hämäläinen Jouni, Kurkela Esa, Kyttö Matti, Laurikko Juhani, Mäkinen Tuula, Peltola Esa, Rosenberg Rolf, Sipilä Kari, Vanttola Timo, Lehtilä Antti. Energia Suomessa - Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. 3. täysin uudistettu painos. Helsinki 2004. VTT Prosessit. Edita. 396 s. ISBN 951-37-2745-9
- (Kendall 2008) Kendall Gary. Plugged In, The End of Oil Age. 2008. World Wide Fund for Nature. Saatavissa: [http://assets.panda.org/downloads/plugged\\_in\\_full\\_report\\_\\_\\_final.pdf](http://assets.panda.org/downloads/plugged_in_full_report___final.pdf)
- (Kiehne 1983) Kiehne H.A. Batterien, Band 37, Kontantk 2 Studium, Elektrotechnik, Expert Verlag. Germany 1983. 71s.
- (Kim 2008) Kim B.G. Tredeau F.P. Salameh Z.M. Performance Evaluation of Lithium Polymer Batteries for Use in Electric Vehicles. 2008. The Institute of Electrical and Electronics Engineering Inc. s.1-5. ISSN 978-1-4244-1849-7

- (Kivinen 1978) Kivinen Antti, Mäkitie Osmo. Kemia. Keuruu 1978. Ota-  
va. 478s. ISBN 951-1-04393-5
- (Larjola 2006) Larjola Jaakko. Energiamuuntoprosessit - kurssin luento-  
materiaalit. 2006. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto.
- (Larjola 2008) Larjola Jaakko. Uusiutuva energia – opintojakson luento-  
kalvot. Luento 6. 2008. Virtaustekniikan laboratorio.  
Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. 29s.
- (Le 2003) Le Thomas. Fuel Cells: The Epidemic of the Future.  
2003. The Institute of Electrical and Electronics Enginee-  
ring Inc. s. 505–510. ISSN 0-941783-23-5
- (Miles 2001) Miles M.H. Recent Advances in Lithium Battery Techno-  
logy. 2001. The Institute of Electrical and Electronics En-  
gineering Inc. GaAs 23rd Annual Technical Digest.  
s.219–222
- (Miller 2002) Miller Ted J. Lithium Ion Battery Automotive Applica-  
tions and Requirements. 2002. The Institute of Electrical  
and Electronics Engineering Inc. s.113–118. ISSN 0-  
7803-7132-1
- (Mitsubishi 2008) Mitsubishi Motors. Latest MMC Technologies And Near-  
Future Goals. Viitattu: 10.12.2008 Saatavissa:  
[http://www.mitsubishimotors.com/corporate/about\\_us/tec-  
hnology/enviroment/e/miev.html](http://www.mitsubishimotors.com/corporate/about_us/technology/enviroment/e/miev.html)
- (Mitsubishi 2009) Mitsubishi Motors. Electric Vehicle MiEV. 4 Innovations.  
Viitattu: 19.01.2009. Saatavissa: [http://www.mitsubishi-  
motors.com/special/ev/4innovations/index.html](http://www.mitsubishi-<br/>motors.com/special/ev/4innovations/index.html)
- (Motiva 2006) Motiva Oy. Treatise-projekti. Vaihtoehtoiset Polttoaineet  
ja Ajoneuvot. Viitattu: 19.01.2009. Saatavissa:

[http://www.treatise.eu.com/UserFiles/File/Vaihtoehtoiset%20polttoaineet%20ja%20ajoneuvot%20Manual\\_FI.pdf](http://www.treatise.eu.com/UserFiles/File/Vaihtoehtoiset%20polttoaineet%20ja%20ajoneuvot%20Manual_FI.pdf)

- (Motiva 2008) Motiva Oy. Kuljetusalan polttoainevaihtoehdot. Viitattu: 8.12.2008. Saatavissa: <http://www.motiva.fi/fi/yjay/kuljetusala/polttoainevaihtoehdot/>
- (Mpower 2006) Mpower. Battery and Energy Technologies. Battery Comparison. Viitattu: 2.12.2008. Saatavissa: [www.mpoweruk.com/specifications/comparisons.pdf](http://www.mpoweruk.com/specifications/comparisons.pdf)
- (Nishi 1998) Nishi Y. Katayama K. Shigetomi J. Horie H. The development of lithium-ion secondary battery systems for EV and HEV. 1998. The Institute of Electrical and Electronics Engineering Inc. s.31–36. ISSN 0-78034098-1
- (Nylund 2007) Nylund Nils Olof, Aakko-Saksa Päivi. Liikenteen polttoainevaihtoehdot. Kehitystilanneraportti. Laaja versio. 2007. TEC TransEnergy Consulting Oy. Viitattu: 9.12.2008. Saatavissa: <http://www.motiva.fi/midcom-serveattachmentguid-559861890aa9cc0400417b5cd0c1d20f/liikenteen-polttainevaihtoehdot----kehitystilanneraportti.pdf>
- (Ohlström 2005) Ohlström M, Savolainen I. Teknologiaa Kasvihuonekaasujen Vähentämiseen – Taustatyö Kansallisen Ilmastostrategian Päivittämiseen. 2005. Kauppa- ja teollisuusministeriön julkaisuja. Saatavissa: [http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm\\_jur/ktmjur.nsf/a8c79e11f75754f6c2256ba4002dbfa1/ee9b7badf2d2edf6c2256fa300326444/\\$FILE/jul1eos\\_2005.pdf](http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/a8c79e11f75754f6c2256ba4002dbfa1/ee9b7badf2d2edf6c2256fa300326444/$FILE/jul1eos_2005.pdf)
- (Ovshinsky 1999) Ovshinsky S.R. Dhar S.K. Fetcenko M.A. Corrigan D.A. Reichman B. Young K. Fierro C. Venkatesan S. Gifford P. Koch J. Advanced Materials for Next Generation

- NiMH Portable, HEV and EV Batteries. 1999. The Institute of Electrical and Electronics Engineering Inc. s.17–23. ISSN 0885-8985
- (Partanen 1997) Partanen Jarmo. Sähköenergiatekniikan perusteet. Opetusmoniste EN C-98. 1997. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. ISBN 951-764-123-0
- (Pihkala 2009) Pihkala Juhani. Prosessitekniikan kokonaisprosessit – verkkomateriaali. Keskipohjanmaan koulutusyhtymä. Viitattu: 21.09.2009. Saatavissa: <http://prosessitekniikka.kpe.fi/index-kp-kp.htm>
- (Pynnä 1984) Pynnä Kari, Suominen Matti, Lammi Kalervo. Autotekniikan käsikirja. Sähkölaitteet. Helsinki 1984. Kustannusosakeyhtiö Tammi. 639 s. ISBN 951-30-5215-X
- (Pyrhönen 2005) Pyrhönen Juha. Sähkökäytöt. Opetusmoniste. 2005. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto
- (Silvonen 2006) Silvonen Seppo. KTM-työohjelma 2006–2007. 2006. Motiva Oy. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/attachment/f16d4d543f99d7a59f54560a69063a0e/4f6983e663f138246ca4b56b63e70d32/Motiva\\_KTM-ty%C3%B6ohjelma\\_lopuraportti+2006\\_nettil.pdf](http://www.motiva.fi/attachment/f16d4d543f99d7a59f54560a69063a0e/4f6983e663f138246ca4b56b63e70d32/Motiva_KTM-ty%C3%B6ohjelma_lopuraportti+2006_nettil.pdf)
- (Sähköautot 2009) Sähköautot – Nyt. Viitattu: 19.01.2009. Saatavissa: <http://www.sahkoautot.fi/>
- (Tekno 2009) Teknologiateollisuus. Polttokennoalan toimialaryhmä. Viitattu 19.01.2009. Saatavissa: <http://tekno.teknologia.fi/index.php?m=2&s=5&id=12388>
- (US DOE 2000) Federal Register, Vol. 65, No. 113. Rules and Regulations. 2000. United States Department of Energy

- (Vaclav 2006) Vaclav Smil. Energy: A Beginner's Guide. 2006. One World. 181 s. ISBN 9781851684526
- (Wang 2008) Wang Michael. Estimation of Energy Efficiencies of U.S. Petroleum Refineries. 2008. Center for Transportation research. Argonne National Laboratory. Saatavissa: [http://www.transportation.anl.gov/modeling\\_simulation/GREET/pdfs/energy\\_eff\\_petroleum\\_refineries-03-08.pdf](http://www.transportation.anl.gov/modeling_simulation/GREET/pdfs/energy_eff_petroleum_refineries-03-08.pdf)
- (Whatgreencar 2009) WhatGreenCar.com – The Independent Guide to Green Cars In the UK. Viitattu: 20.01.2009. Saatavissa: <http://www.whatgreencar.com/fuelcellcars.php>
- (WWF 2009) World Wide Fund for Nature. Norjan Aurinkoenergiäteollisuus maailman huipulla. 2009. Viitattu: 25.01.2009. Saatavissa: [http://www.wwf.fi/wwf/www/uploads/pdf/ilmastonmuutos\\_norja\\_aurinkoenergiäteollisuus.pdf](http://www.wwf.fi/wwf/www/uploads/pdf/ilmastonmuutos_norja_aurinkoenergiäteollisuus.pdf)

## **HAASTATTELUT**

Puhelinkeskustelu 26.01.2009 klo 13. Toimistonhoitaja Pekka Suikkanen. Oy Woikoski Ab.

## LASKENTAESIMERKKI HYÖTYSUHTEISTA

## LIITE I, 1

Sähköakkuauton hyötysuhteita:

Taphtuma	Hyötysuhde 1 [%] (Uusiutuvat energialähteet)
Sähköntuotanto	100
Sähkönsiirto ja jakelu	94
Akun laturin hyötysuhde	92
Akun hyötysuhde	65 - 90
Sähköiset häviöt voimansiirrossa	90
Jarrutusenergian talteenotto	110
Sähköakkuauton kokonaishyötysuhde	56 - 77

Kokonaishyötysuhde  $\lambda_{\text{saa, kok}} = (1 \cdot 0.94 \cdot 0.92 \cdot 0.9 \cdot 0.9 \cdot 1.1) \cdot 100 \% = 77 \%$ Sähköakkuauton hyötysuhde  $\lambda_{\text{saa}} = (0.92 \cdot 0.90 \cdot 0.9 \cdot 1.1) \cdot 100 \% = 82 \%$ 

Vetypolttokennoauton hyötysuhteita:

Taphtuma	Hyötysuhde 1 [%] (Uusiutuvat energialähteet)
Sähköntuotanto	100
Vedyn tuotanto reformoimalla	-
Vedyn tuotanto elektrolyysillä	70
Vedyn paineistaminen	90
Vedyn kuljetus ja jakelu	90
Vedyn siirto (auton säiliöön)	97
Vetypolttokennon hyötysuhde	40
Vetypolttokennon loishäviöt	90
Sähköiset häviöt voimansiirrossa	90
Jarrutusenergian talteenotto	110
Vetypolttokennoauton kokonaishyötysuhde	20

Kokonaishyötysuhde  $\lambda_{\text{va, kok}} = (1 \cdot 0.7 \cdot 0.9 \cdot 0.9 \cdot 0.97 \cdot 0.4 \cdot 0.9 \cdot 0.9 \cdot 1.1) \cdot 100 \% = 20 \%$ Vetypolttokennoauton hyötysuhde  $\lambda_{\text{va}} = (0.4 \cdot 0.90 \cdot 0.9 \cdot 1.1) \cdot 100 \% = 36 \%$

## LASKENTAESIMERKKI HYÖTYSUHTEISTA

## LIITE I, 2

Polttomoottoriauton hyötysuhteita (Diesel, Bensiini):

Taphtuma	Hyötysuhde (Diesel) [%]	Hyötysuhde (Bensiini) [%]
Polttoaineen tuotanto	90	88
Polttoaineen kuljetus ja jakelu	94	94
Polttomoottori	30	23
Voimansiirron hyötysuhde	82	82
Polttomoottoriauton kokonaishyötysuhde	21	16

Bensiini-auton kokonaishyötysuhde  $\lambda_{b, kok} = (0.88 \cdot 0.94 \cdot 0.23 \cdot 0.82) \cdot 100 \% = 16 \%$

Bensiini-auton hyötysuhde  $\lambda_b = (0.23 \cdot 0.82) \cdot 100 \% = 19 \%$

Diesel-auton kokonaishyötysuhde  $\lambda_{d, kok} = (0.9 \cdot 0.94 \cdot 0.3 \cdot 0.82) \cdot 100 \% = 21 \%$

Diesel-auton hyötysuhde  $\lambda_d = (0.3 \cdot 0.82) \cdot 100 \% = 25 \%$

**Sähkön kustannukset (25 000 km):**

$$\text{Sähkön hinta} \quad h_s = 14 \text{c} / \text{kWh}$$

$$\text{Energian kulutus} \quad E_k = 8 \cdot \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}}$$

$$\text{Sähköakkuauton hyötysuhde} \quad \lambda_{\text{sa}} = 82 \% = 0.82$$

Polttoainekustannukset 25 000 km ajomatkan jälkeen:

$$K_{s, 25000\text{km}} = \frac{8 \text{ kWh} / 100 \text{ km}}{0.82} \cdot 0.14 \text{ €/ kWh} \cdot 25000 \text{ km} = 341.5 \text{ €}$$

**Vedyn kustannukset (25 000 km):**

$$\text{Vedyn hinta} \quad h_v = \frac{25.9 \text{ €}}{1.8 \text{ m}^3} \text{ (200 bar)}$$

$$\text{Energian kulutus} \quad E_k = 8 \cdot \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}}$$

$$\text{Vetypolttokennoauton hyötysuhde} \quad \lambda_{\text{va}} = 36 \% = 0.36$$

$$\text{Vedyn energiatiheys} \quad L_v = 119 \text{ MJ} / \text{kg} \text{ (CEC 2007)}$$

$$\text{Vedyn moolimassa} \quad M = 1.00794 \text{ g/mol}$$

$$\text{Moolinen kaasuvakio} \quad R = 0.0831 \frac{\text{bar} \cdot \text{dm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

Vedyn massa lasketaan kaavan 1 mukaan

$$m = \frac{M \cdot p \cdot V}{R \cdot T}, \quad (1)$$

missä  $m$  on massa,  $M$  vedyn moolimassa,  $p$  paine,  $V$  tilavuus,  $R$  moolinen kaasuvakio ja  $T$  lämpötila.

Polttoainekustannukset lasketaan kaavan 2 mukaan

$$K_v = \frac{E_k}{\lambda_{\text{va}}} \cdot \frac{h_v}{m \cdot M} \cdot l, \quad (2)$$

Missä  $l$  on matka.



**LASKENTAESIMERKKI POLTTOAINEKUSTANNUKSISTA****LIITE II, 2**

Polttoainekustannukset 25 000 km ajomatkan jälkeen:

$$K_{v, 25000\text{km}} = \frac{8 \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}}}{0.36} \cdot \frac{25.9 \text{ €} \cdot 0.0831 \frac{\text{bar} \cdot \text{dm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 293.15 \text{ K}}{200 \text{ bar} \cdot 1.8 \text{ m}^3 \cdot 1.00794 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 119 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} \cdot 25000 \text{ km} = 292.2 \text{ €}$$

**Bensiinin kustannukset (25 000 km):**

Bensiinin hinta  $h_b = 1.2 \text{ €} / \text{dm}^3$

Energian kulutus  $E_k = 8 \cdot \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}}$

Bensiini-auton hyötysuhde  $\lambda_{ba} = 19 \% = 0.19$

Bensiini-polttoaineen lämpöarvo  $L_b = 32.1 \text{ MJ} / \text{dm}^3$  (CEC 2007)

Polttoainekustannukset 25 000 km ajomatkan jälkeen:

$$K_{b, 25000\text{km}} = \frac{8 \text{ kWh}}{0.19} \cdot \frac{1.2 \text{ €}}{\text{dm}^3} \cdot \frac{\text{dm}^3}{32.1 \text{ MJ}} \cdot 25000 \text{ km} = 1416.6 \text{ €}$$

**Dieselin kustannukset (25 000 km):**

Dieselin hinta  $h_d = 1 \text{ €} / \text{dm}^3$

Energian kulutus  $E_k = 8 \cdot \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}}$

Diesel-auton hyötysuhde  $\lambda_{da} = 25 \% = 0.25$

Diesel-polttoaineen lämpöarvo  $L_d = 36.7 \text{ MJ} / \text{dm}^3$  (CEC 2007)

Polttoainekustannukset 25 000 km ajomatkan jälkeen:

$$K_{d, 25000\text{km}} = \frac{8 \text{ kWh}}{0.25} \cdot \frac{1 \text{ €}}{\text{dm}^3} \cdot \frac{\text{dm}^3}{36.7 \text{ MJ}} \cdot 25000 \text{ km} = 784.7 \text{ €}$$