



Sanna Seppälä

Sähköautojen akkujen kemia

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Auto- ja kuljetustekniikan ko
Insinööriyö
13.1.2011

Tekijä(t) Otsikko	Sanna Seppälä Sähköautojen akkujen kemia
Sivumäärä Aika	40 sivua + 5 liitettä 13.1.2011
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikan ko
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja(t)	Pasi Oikarinen Ari Jokialho
<p>Tämän opinnäytetyön aiheena on sähköautojen akkujen kemia jaksollisessa järjestelmässä. Työn tarkoituksena on tutkia akkujen kemiallisia ominaisuuksia sähköautojen vaatimusten kannalta. Ominaisuuksien tutkimisen tarkoituksena ei ole asettaa akkuja paremmuusjärjestykseen tai käsitellä kaikkia mahdollisia markkinoilta löytyviä akkusovelluksia. Sen sijaan tarkoituksena on selvittää, mistä sähköautojen akuilta vaadittavat ominaisuudet johtuvat. Tavoitteena on keskittyä tutkimaan, voiko nykyisten akkujen ominaisuuksien perusteella löytää jaksollisesta järjestelmästä loogisuuksia ja johdonmukaisuuksia niin, että saatujen tulosten pohjalta voisi toteuttaa sähköauton optimiakun. Työ on luonteeltaan sekä kirjallisuus- että tutkimuspohjainen.</p> <p>Työn alussa käsitellään lyhyesti sähkökemialla ja akun perustoimintaa. Seuraavaksi esitellään viisi eri akkuryhmään: lyijyakku, alkaliakku, virtausakku, natriumakku ja litiumakku. Näistä viidestä ryhmästä työhön valittiin tutkittavaksi lyijyakun sovelluksista AGM-akku, alkaliakkujen sovelluksista nikkeli-metallihydridiakku ja virtausakkujen sovelluksista sinkki-klooriakku. Natriumakuista valittiin tutkittavaksi natrium-nikkeliklooriakku (ZEBRA-akku) ja litiumakuista litiumioniakku. Lisäksi käsitellään sähköauton akuilta vaadittavista ominaisuuksista ne, jotka vaikuttavat sähköauton ajomatkaan, akun latausaikaan, akun elinikään, akun turvallisuuteen ja akun kierrätykseen. Johdonmukaisuuksien etsimiseen päädyttiin käyttämään vain ajomatkaa, latausaikaa ja akun elinikää koskevia tietoja, koska turvallisuuteen ja kierrätykseen vaikuttavat monet kemian ulkopuoliset asiat. Akut asetettiin elektrodipariensa mukaan jaksolliseen järjestelmään parhaiten ominaisuuden toteuttavasta heikoimpaan.</p> <p>Tutkimuksessa ei löydetty jaksollisesta järjestelmästä selkeitä johdonmukaisuuksia akkujen elektrodiparien avulla. Tästä voidaan päätellä, että joko etsittyjä johdonmukaisuuksia ei ole tai sitten tutkimusalueetta tulisi laajentaa.</p>	
Avainsanat	akku, akkukemia, sähköauto, auto

Author	Sanna Seppälä
Title	Chemistry of Batteries in Electric Vehicles
Number of Pages	40 pages and 5 appendices
Date	13 January 2011
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Degree	Bachelor of Engineering
Instructor Supervisor	Pasi Oikarinen Ari Jokialho
<p>This thesis deals with the chemistry of electric vehicle batteries in the periodic table. The aim of the thesis is to study the chemical features of the batteries which are demanded in the performance of electric vehicles. The thesis does not compare the batteries or investigate all the existing batteries in the market. Instead, the aim is to find out what the origins of the features demanded are. The thesis concentrates on investigating if it is possible to find logicalities and consistencies in the periodic table based on the features of the existing batteries, so that it would be possible to produce an optimum battery for electric vehicles. This thesis is based on literature and research work.</p> <p>First the basics of electric chemistry and the function of batteries are described. Then five different battery groups are introduced: lead/acid battery, alkaline battery, flow battery, sodium battery and lithium battery. From these five groups the AGM-battery was chosen to represent lead/acid batteries, the nickel/metal hydride battery was chosen to represent the alkaline batteries and the zinc/chlorine was chosen to represent the flow batteries. From sodium batteries the sodium/metal chloride (ZEBRA) battery was chosen and from lithium batteries the lithium-ion battery was chosen. Next the features of the batteries that affect the electric vehicle's driving range, the charging time of the batteries, the life time of the batteries, safety of the batteries and the recycling of the batteries are dealt with. In order to find the possible consistencies from the periodic table a decision was made to use only the data on electric vehicle's driving range, batteries' charging time and batteries' life time. This was done because many factors other than chemistry affect the safety and recycling of the batteries. The batteries were placed in the periodic table based on their electrodes, starting from the one that served the studied feature best.</p> <p>No clear consistencies in the periodic table based on the batteries' electrodes were found. On the basis of the study it is possible to make a conclusion that there are no consistencies or that the area of research should be expanded.</p>	
Keywords	battery, battery chemistry, electric vehicle, car.

Sisällys

1 Johdanto	1
2 Sähkökemia	2
2.1 Perusteet	2
2.2 Akku	3
3 Tutkittavat akut	6
3.1 Lyijyakku	6
3.1.1 Avoin lyijyakku	7
3.1.1 Suljettu lyijyakku, VRLA-akku	8
3.2 Alkaliakut	9
3.2.1 Nikkeli/kadmiumakku (NiCd)	9
3.2.2 Nikkeli/metallihydridiakku (NiMH)	10
3.3 Virtausakut	11
3.3.1 Sinkki/klooriakku (ZnCl ₂)	12
3.3.2 REDOX-akku	13
3.4 Natriumakut	15
3.4.1 Natrium/rikki-akku (NaS)	15
3.4.2 Natrium/metallikloridi-akku (NaNi, NaFe)	16
3.5 Litiumakku	17
3.5.1 Litiumioniakku	18
3.5.2 Litiumpolymeeriakku	20
4 Vaadittavat ominaisuudet	21
4.1 Ajomatka	21
4.2 Akun lataus	23
4.3 Kestoikä	25
4.4 Hinta	27
4.5 Turvallisuus	29
4.1 Kierrätys	32
5 Ominaisuudet jaksollisessa järjestelmässä	34
5.1 Ajomatka	34
5.2 Latausaika	36
5.3 Akun kestoikä	37
6 Johtopäätökset	38
7 Lopuksi	40

Lähteet

Liitteet

- Liite 1. Normaalipotentialitaulukko
- Liite 2. Omavalmisteinen sähköauto
- Liite 3. Metallien hinnat
- Liite 4. Alkuaineiden jaksollinen järjestelmä
- Liite 5. Tutkittujen akkujen ominaisuudet jaksollisessa järjestelmässä

1 Johdanto

Tällä hetkellä koko automaailma on käymässä läpi suurta muutosta. Polttomoottoriautot ovat jäämässä syrjään vähemmän kuluttavien ja etenkin vähemmän päästöjä tuottavien ajoneuvojen tieltä. Niiden rinnalle on markkinoille tullut jo paljon erilaisia hybridejä ja sähköautoja. Tämänhetkinen akkutekniikka vaatii kuitenkin vielä lisäkehittelyä, jotta saavutetaan polttomoottoriauton kanssa kilpailukykyinen suoritusaso. Kehityksen hitaus on johtunut muun muassa siitä, että akkukemiassa on valtavasti erilaisten yhdisteiden vaihtoehtoja ja akuilta vaaditaan useita eri ominaisuuksia. Kemia on kuitenkin johdonmukaista ja seuraa tiettyjä lainalaisuuksia. Sen vuoksi olisi loogista ajatella, että asettamalla tiedot jo kehitetyistä ja testatuista akuista jaksolliseen järjestelmään, voisi olla mahdollista löytää tiettyjä johdonmukaisuuksia.

Tässä opinnäytetyössä esitellään aluksi lyhyesti akku ja sen toiminnan perusteet. Seuraavaksi tutkitaan viisi eri akkuryhmää ja valitaan jokaisesta yksi tutkimuksen kohteeksi. Valituista akuista kerätään sähköautolta vaadittaviin ominaisuuksiin vaikuttavat tiedot ja tutkitaan, mistä ne johtuvat. Tämän jälkeen akkujen elektrodimateriaalit asetetaan jaksolliseen järjestelmään tutkitun ominaisuuden parhaiten toteuttavasta heikoimpaan. Tavoitteena on etsiä jaksollisesta järjestelmästä sellaisia johdonmukaisuuksia, joiden avulla voisi toteuttaa sähköauton optimiakun. Tutkimus tehdään selvittämällä, osoittautuvatko mitkään aineet paremmiksi kuin toiset tutkittavan ominaisuuden kannalta.

2 Sähkökemia

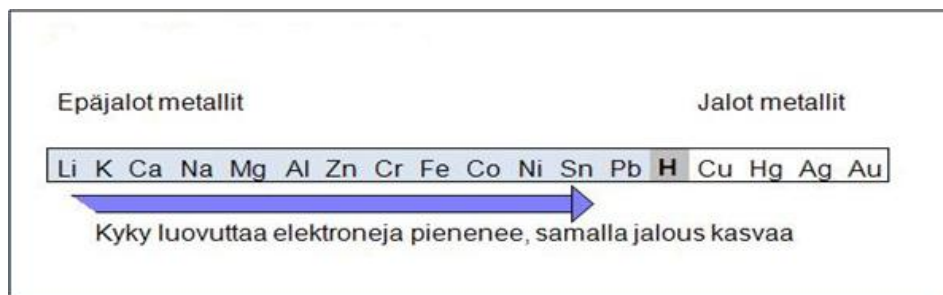
2.1 Perusteet

Akkujen toiminta perustuu sähkökemiaan. Sähkökemia on kemian osa-alue, joka tarkastelee elektronien liikkeitä. Elektronit ovat atomin osia. Atomissa on neutroneista ja protoneista koostuva ydin, jonka ympärillä leijuu elektronipilvi. Atomi kokonaisuudessaan on varaukseton. Tämä johtuu siitä, että ytimessä sijaitsevien positiivisesti varautuneiden protonien ja atomin negatiivisten elektronien määrä on aina sama. Eri alkuaineiden atomeilla on eri määrä protoneja ja elektroneja. Elektronit sijaitsevat ytimen ympärillä lukumääränsä mukaan elektronivöillä. Ulointa elektronivyötä kutsutaan valenssivyöksi. Sähkövirta on valenssivyön elektronien liikettä. [1, s. 5.]

Sähkökemian perustana ovat hapettumis- ja pelkistymisreaktiot. Näissä reaktioissa siirtyy elektroneja aineelta toiselle. Hapettimeksi sanotaan ainetta, joka tapahtuvassa reaktiossa vastaanottaa elektroneja. Pelkistimeksi taas sanotaan ainetta, joka luovuttaa elektroneja. Aineen vastaanottaessa elektroneja sen hapetusluku pienenee, ja aineen luovuttaessa elektroneja sen hapetusluku kasvaa. Hapettuminen ja pelkistyminen kulkevat aina käsi kädessä, eli jos jokin aine luovuttaa reaktiossa elektroneja, on jonkin toisen vastaanotettava niitä. Kun aine luovuttaa tai vastaanottaa elektronin, sen elektronien ja protonien määrä eroavat toisistaan. Tästä syntyy aineen sähköinen varaus. Sähköinen varaus on negatiivinen tai positiivinen riippuen siitä, onko aine vastaanottanut vai luovuttanut elektroneja. Atomia, joka on luovuttanut tai vastaanottanut elektronin, sanotaan ioniksi. Toisin kuin atomilla, ionilla on aina sähkövaraus. Positiiviset ionit vetävät elektroneja puoleensa, ja ionit toimivat näin elektronien kuljettajina. Koska hapettuminen ja pelkistyminen tapahtuvat aina yhdessä, ei reaktioissa syntyvillä molekyyileillä kuitenkaan koskaan ole sähkövarausta. [2, s. 88 - 89.]

Aineen kykyä toimia hapettimena tai pelkistimenä eli sen kykyä ottaa vastaan tai luovuttaa elektroneja kuvaa sen normaalipotentiali arvo E° (liite 1). Mitä positiivisempi

aineen E° -arvo on, sitä paremmin reaktio pyrkii etenemään taulukossa oikealle. Nämä E° -arvot määrittelevät, kumpi reagoivista aineista hapettuu ja kumpi pelkistyy. Niitä aineita, jotka hapettuvat helposti, kutsutaan epämetalleiksi, ja niitä jotka hapettuvat huonosti, kutsutaan jalometalleiksi. Alkuaineet on voitu järjestää hapettumiskyvyn mukaiseen järjestykseen, jota kutsutaan metallien jännitesarjaksi (Kuva 1). Voimakkaita hapettimia ovat esimerkiksi fluori ja jaksollisen järjestelmän jakson 17 epämetallit happi O_2 ja jaksollisen järjestelmän ryhmän 16 epämetallit. Vastaavasti voimakkaista pelkistimistä voidaan mainita esimerkkinä alkalimetallit kuten litium. Rajaajana hapettimien ja pelkistimien välissä toimii vety. Jännitesarjassa ennen vetyä esiintyvät metallit reagoivat happojen kanssa. Mitä kauempana vedystä metalli on, sitä kiivaammin se reagoi eli luovuttaa elektroneja. Vedyn jäljessä olevat metallit eli jalot metallit eivät juuri reagoi happojen kanssa. Mutta vaikka niiden kyky luovuttaa elektroneja on epämetalleihin nähden huomattavasti huonompi, ne voivat kuitenkin luovuttaa elektroneja. [3; 4, s. 146.]

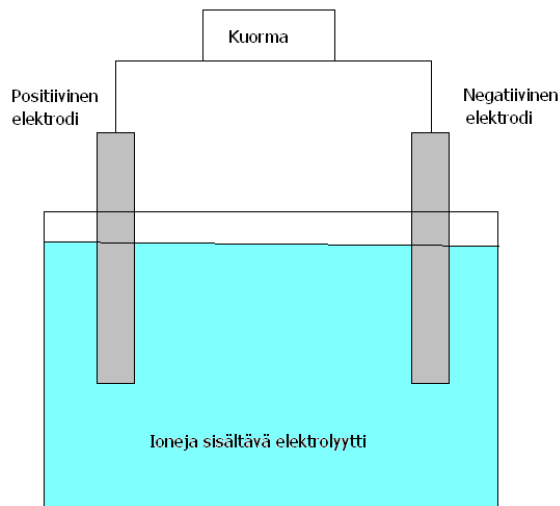


Kuva 1. Osa metallien jännitesarjasta [4, s. 146]

2.2 Akku

Akku on laite, johon varastoidaan energiaa ja josta se tarvittaessa saadaan pois. Akkusanaa voidaan käyttää melkein aina, kun energiaa säilötään hetkellisesti johonkin. Sähköautojen kannalta kiinnostavimpia ovat kuitenkin kemialliseen reaktioon perustuvat akut. Ne muuttavat virtalähteeltä saamansa energian kemialliseksi ja kytkettäessä virtapiiriin muuttavat sen takaisin sähköenergiaksi. Jatkossa kun tässä työssä puhutaan akusta, tarkoitetaan edelle mainitun mukaista kemialliseen reaktioon perustuvaa akkua.

Akku koostuu yhdestä tai useammasta kennosta. Kennojen peruskomponentit ovat positiivinen elektrodi, negatiivinen elektrodi ja ioneja sisältävä neste eli elektrolyytti. Tätä havainnollistaa kuva 2.



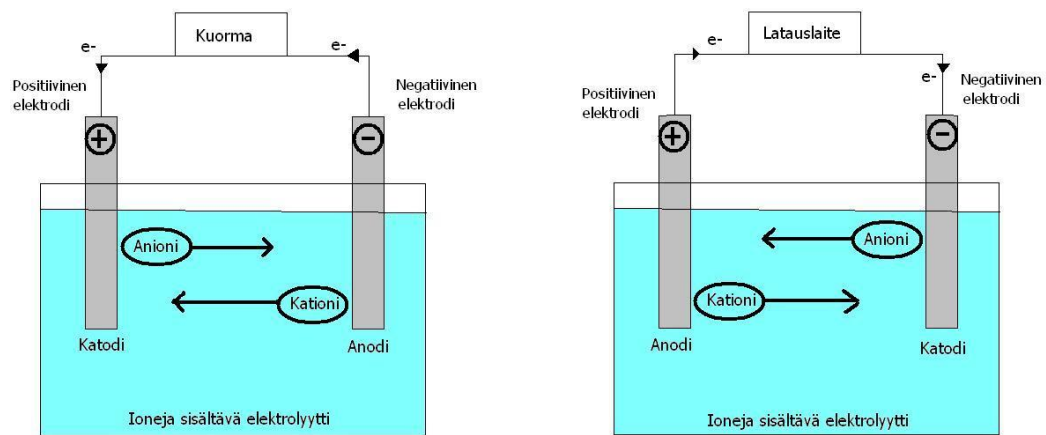
Kuva 2. Kennon peruskomponentit

Akun kennon toiminta perustuu sen positiivisen ja negatiivisen elektrodin väliseen potentiaalieroon eli niiden väliseen jännite-eroon. Kun akku on varatussa tilassa, vaikuttaa sen elektrodimateriaalien välillä jännite, joka saa aikaan elektronien virtauksen. Kennossa toisen elektrodin pinnalla syntyy hapetusreaktioissa ioneja ja toisella niitä tuhoutuu pelkistysreaktioissa. Positiivinen elektrodi voi olla happi, sulfidi tai jokin muu komponentti, joka kykenee pelkistymään, kun kennosta puretaan varausta. Negatiivinen elektrodi on yleensä metallia tai seos joka kykenee hapettumaan. Kummankin elektrodin tulee olla sähköä johtavaa materiaalia, jotta ne pystyvät kuljettamaan elektroneja reaktioihin ja niistä pois. Niissä tapauksissa joissa positiivisen elektrodin sähkönjohtokyky ei ole riittävä, sotketaan sen joukkoon johtavaa aineita (esimerkiksi hiiltä). Kennon elektrolyytti takaa polun elektrodien välille. Sillä on korkea ja valikoiva ionien johtavuuskyky niille ioneille, jotka ottavat osaa elektrodien reaktioihin. Elektrolyytin tulee olla ei-johtavaa elektroneille, jotta vältetään kennon itse purkautuminen. [5, s. 10 - 11.]

Akkua purettaessa negatiivinen elektrodi kerää reaktioissa vapautuneet elektrodit ja positiiviset ionit jäävät sen pinnalle. Elektronit kulkevat negatiiviselta elektrodilta kuormana olevan laitteen kautta positiiviselle elektrodille, jossa ne osallistuvat

lopulliseen reaktioon. Kulkiessaan laitteen läpi, elektronit saavat aikaan sähkövirran. Reaktioissa negatiivinen elektrodi hapettuu ja positiivinen elektrodi pelkistyy.

Akkua ladattaessa käytetään elektrolyysiä erottamaan aineet alkuperäiseen muotoonsa. Kun latauslaite kytketään akun elektrodeihin, alkavat positiiviset ionit pyrkiä kohti negatiivista elektrodiä, jossa ne pelkistyvät takaisin alkuperäiseen muotoonsa. Samalla negatiiviset ionit liikkuvat kohti positiivista elektrodiä, jonka pinnalla ne hapettuvat takaisin alkuperäiseen olomuotoonsa (kuva 3). [5, s. 11 - 13.]



Kuva 3. Ladattavan kennon toimintaperiaate

3 Tutkittavat akut

Jotta akkujen ominaisuuksia voitaisiin tämän työn tarkoituksen mukaisesti verrata jaksollisen järjestelmän avulla, on ensin tunnettava tutkittavien akkujen perustoiminta. Työhön valitaan vertailun kohteeksi viisi toisistaan eroavaa akkutyyppeä, jotka kaikki ovat jossakin vaiheessa olleet sähköauton akkujen kehityskohteena. Valinnassa on pyritty siihen, että valitut akut olisivat keskenään mahdollisimman erilaisia, sillä mitä enemmän valitut akut poikkeavat toisistaan, sitä voimakkaammin voidaan jaksollisesta järjestelmästä olettaa löytyvän loogisuuksia niiden ominaisuuksien perusteella. Valittuihin viiteen akkutyyppeihin on päädytty, koska ne ovat jo olleet kehitystyönkohteena ja päätyneet markkinoille hyvästä syystä, joten niiden valmistajien tekemää arvokasta tutkimustyötä ei kannata sivuuttaa. Kaikista näistä akkutyypeistä on kuitenkin tehty useita eri sovelluksia vaihtelevien käyttötarkoitusten mukaan. Siksi onkin mahdotonta esittää yleisiä akkuominaisuuksia jostakin akkutyypistä. Tämän vuoksi keskitytään ensin tutkimaan viittä erilaista akkuryhmää edustavia akkuja ja kunkin akkutyypin, minkä jälkeen jokaisesta ryhmästä valitaan yksi akkusovellus tutkimukseen mukaan. Ensimmäisenä tarkastellaan kemiallisista akuista tunnetuinta, lyijyakkuja.

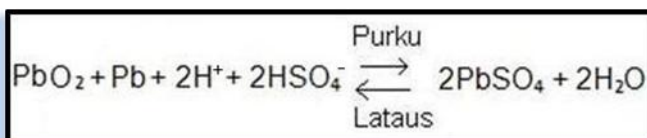
3.1 Lyijyakku

Lyijyakku, joka on keksitty jo vuonna 1859, oli ensimmäinen kaupalliseen käyttöön tullut akku. Suosionsa lyijyakku on säilyttänyt tähän päivään asti, sillä se on markkinoilta löytyvistä akuista ehdottomasti edullisin. Lyijyakkuja voimanlähteenä käyttäviä sähköajoneuvoja ovat olleet mm. General Motorsin Kalifornian ZEV-ohjelmaa varten valmistamat EV-1, (toimintasäde kaupunkiajossa 121 km ja maantiellä 126 km) ja S-10 (toimintasäde kaupunkiajossa 74 km ja maantiellä 69 km) sekä Suomessa ELCAT. Mielenkiintoisena lisänä yritysten valmistamille sähköautoille Akkutalo Finn Suko Oy esitteli uutisartikkelissaan 23.6.2010 (liite 2) omavalmisteisen sähköauton, jonka toimintasäde on 50 km. [5, s. 100, 206; 6, s. 67.]

Nykyään lyijyakkuja on kuluttajien saatavilla kahta eri tyyppiä; avoimia lyijyakkuja ja suljettuja lyijyakkuja eli VRLA-akkuja. Pääasiallinen ero näillä on se, että avoimen lyijyakun elektrolyytti on nestemäisessä muodossa ja siihen tulee lisätä vettä. VRLA-akku eli suljettu lyijyakku taas on huoltovapaa ja siinä elektrolyytti on joko geelimäisessä muodossa tai imeytetty lasikuitumattoon. Kaikki lyijyakut perustuvat kuitenkin samoihin sähkökemiallisiin reaktioihin. Lyijyakku on hieman poikkeuksellinen akku muihin verrattuna. Toisin kuin muissa akuissa sen elektrolyytinä toimiva laimennettu rikkihappo (H_2SO_4) ottaa osaa elektrodeilla syntyviin kemiallisiin reaktioihin. [7.]

3.1.1 Avoin lyijyakku

Avoimessa lyijyakussa elektrolyytinä toimii nestemäisessä muodossa oleva, vedellä laimennettu rikkihappo (H_2SO_4). Positiivinen elektrodi on valmistettu massamalla positiivisiksi tarkoitetut levyrungot lyijyoksidilla (PbO_2) ja negatiivisiksi tarkoitetut levyrungot lyijyllä (Pb). Nämä levyrungot on asetettu elektrolyyttiä sisältävään astiaan. Kun akku liitetään virtapiiriin, alkavat positiivisten levyjen lyijyoksidi ja negatiivisten levyjen lyijy reagoida rikkihapon kanssa muodostaen lyijysulfaattia elektrodilevyille ja muuttaen elektrolyytti rikkihapon pitoisuutta reaktioyhtälöiden mukaisesti (yhtälö 1). Akun purkautuessa elektrolyytin väkevyyden pienenee (tiheys laskee $1,27 \rightarrow 1,18 \text{ g/cm}^3$) ja ladattaessa väkevyyden kasvaa (tiheys nousee $1,18 \rightarrow 1,27 \text{ g/cm}^3$). Tiheyden perusteella voidaan akun latausastetta tarkkailla. Täyteen ladatun lyijyakun elektromotorinen voima on 2 V. Akkua ladattaessa negatiivisella elektrodilla sijaitseva lyijysulfaatti pelkistyy takaisin lyijyksi ja positiivisella elektrodilla sijaitseva lyijysulfaatti hapettuu lyijyoksidiksi. [6, s. 50 - 51.]



(1)

3.1.2 Suljettu lyijyakuu, VRLA-akuu

VRLA-akulla (Valve Regulated Lead Acid) tarkoitetaan sellaista lyijyakkua, jossa elektrolyytti ei ole nestemäisessä muodossa. Tällaisista lyijyakuista on kahdenlaisia sovelluksia, geeliakkuja ja AGM-akkuja (Absorbent Glass Mat). Geeliakuissa elektrolyytti on saatettu geelimuotoon ja AGM-akuissa elektrolyytti on imeytetty lasikuitumattoon. Trukeissa ja vastaavissa sisäkuljetusajoneuvoissa käytetään enimmäkseen perinteisiä lyijyakkuja, joissa elektrolyytti on nestemäisessä muodossa ja jotka vaativat säännöllistä veden jälkitäyttöä. Sähköautokäytössä vastaavanlaista huoltopakkoa ei kuitenkaan ole haluttu hyväksyä, ja kiinteäelektrolyyttisellä lyijyakulla on myös muita etuja avoimeen lyijyakuun nähden. Se on vuotamaton ja voidaan asentaa lähes mihin asentoon tahansa, vaikka asennusta täysin ylösalaisin ei kuitenkaan suositella. Huoltovapaus VRLA-akuissa perustuu siihen että niissä käytetään kemiallista reaktiota, jossa lyijyakun positiivisella lyijylevyllä muodostuva happi (O_2) absorboidaan negatiivisella levyllä. Reaktio vähentää negatiivisella levyllä muodostuvaa vetyä (H_2) ja tilalle syntyy vettä (H_2O), joka pitää huolta akun kosteustasapainosta. VRLA-akkuja ei koskaan saa avata, sillä akkuun pääsisi silloin ylimääräistä happea, joka aiheuttaisi akun rikkoutumisen. Akkuun ei myöskään tule, eikä edes saa, lisätä vettä. [7.]

Verrattaessa geeliakkua ja AGM-akkua tulee huomioida, että geeliakun teho heikkenee lämpötilan laskiessa nopeammin, kun AGM-aku taas pystyy myös kylmänä luovuttamaan suuriakin virtoja. Geeliakku soveltuu kuitenkin AGM-akkua paremmin kohteisiin, joissa akkuu syväpuretaan toistuvasti. Kaikille lyijyakuille on kuitenkin yhteistä se, että ne tulisi säilyttää aina täyteen varattuina viileässä paikassa. Kun akku puretaan tyhjäksi, muodostuu negatiivisen ja positiivisen elektrodin pinnalla oleva aktiivinen massa lyijysulfaatiksi, joka on hyvä eriste. Jos akku saa olla tyhjänä pidempään, lyijysulfaattikiteet muodostuvat latautumisreaktion kannalta liian isoiksi rakeiksi eikä virta enää pääse kulkeutumaan toimintakykyiseen lyijysulfaattiin. Tämä tarkoittaa sitä, ettei rikkihappo enää pääse reagoimaan levyillä olevan lyijysulfaatin kanssa eikä se muutu takaisin lyijyksi ja lyijyoksidiksi. Koska purkautuessa elektrolyytin rikkihappo muuttui lähes kokonaan vedeksi, on akun tyhjänä seistessä myös riski, että akku jäätyy. [7.]

Tähän työhön valittiin lyijyakun sovelluksista käsiteltäväksi AGM-akuu.

3.2 Alkaliakut

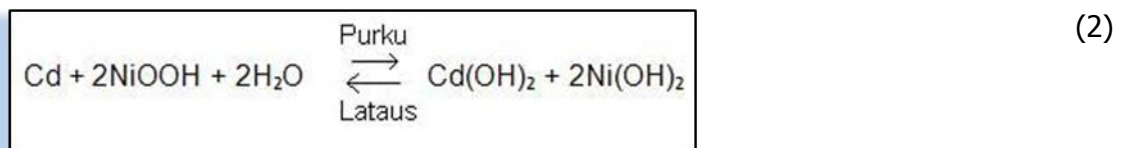
1890-luvun lopulla alkoivat kehittyä akut, joissa elektrolyytti on emäksinen. Näitä akkuja kutsutaan alkaliakuiksi. Sitten ne ovat vallanneet itselleen pysyvän osan markkinoista. Alkaliakuissa sähköenergia syntyy metallin ja hapen reaktiosta. Alkalimetallit muodostavat jaksollisen järjestelmän ensimmäisen alkuaineiden ryhmän, ja niillä kaikilla on suuri pelkistyskyky. Tämän vuoksi ne hapettuvat nopeasti päästessään kosketuksiin ilman kanssa ja muodostavat pinnalleen oksideja. Kun hapettunut metalli asetetaan veteen, reagoivat oksidit veden kanssa muodostaen hydroksideja (NaOH, KOH, LiOH), jotka tekevät liuoksesta emäksisen. Hapetusreaktiossa käytettävää happea voidaan säilyttää järjestelmässä reaktiota varten joko sellaisenaan, metalli-ilmajärjestelmän avulla tai metallioksidin muodossa. Hapen säilyttäminen oksidimuodossa on näistä selvästi tehokkain, mutta vaatii kuitenkin aina metallin säilömistä varten, joka luonnollisesti lisää akun painoa ja laskee näin sen energiatheyttä. [8, s. 241.]

Nikkeli-kadmiumakku (NiCd)

1990-luvun alussa NiCd-akut olivat lyijyakkujen jälkeen yleisimpinä käytössä. Ne vastaavat pitkälti ominaisuuksiltaan Nikkeli/rauta-akkuja (NiFe) ja ovatkin itse asiassa paranneltu versio niistä. Suurimpana erona ja kehityksenä on negatiivisena elektrodina toimiva kadmium, joka antaa NiCd-akulle NiFe-akkuun verrattuna mm. vähäisemmän itsepurkautumisominaisuuden, joka vaivasi NiFe-akkuja. Tämä johtui raudan alhaisesta vedynkehitysjännitteestä. NiCd-akkuja käytetään useimmiten käsityökaluissa ja vastaavissa pienikokoisissa laitteissa, mutta myös muun muassa junissa, sillä NiCd-akut ovat pitkäikäisiä, kestävät hyvin ylivoimista sekä suuria varaus- ja purkausnopeuksia. Ne eivät myöskään ole arkoja lämpötilan vaihteluille. Sähköajoneuvokäytössä NiCd-akkuja pidettiin vahvoina kilpailijoina lyijyakuille, koska niillä on yli kaksi kertaa suurempi energiatheys kuin lyijyakuilla. Myös niiden kyky vastaanottaa virtaa nopeasti on valtava etu sähköautokäytössä ja testausten mukaan akku voidaan ladata täyteen jo tunnissa. [8, s.251 - 255.] Niiden heikkoutena ovat kuitenkin muun muassa korkeat materiaali- ja valmistus-kustannukset, kadmiumin myrkyllisyys ja muistiefekti, joka käsitellään tarkemmin nikkeli-metallihydridiakkujen yhteydessä. NiCd-akut ovat olleet

käytössä esimerkiksi Peugeot 106n, Citroen AX:n ja Renault Clion sähköautoversioissa sekä myös Ford Th!nkissä [9, s. 37].

NiCd-akussa positiivisena elektrodina on hapettunut nikkeli eli nikkelioksihydroksidi (NiOOH) ja negatiivisena elektrodina kadmium (Cd). Elektrolyyttinä on kaliumhydroksidiliuos (KOH) eli lipeä, joka toimii vain elektronien välittäjänä, se ei itse osallistu reaktioihin. Yhtälöstä 2 voi havaita tarkemmin akussa tapahtuvat reaktiot.



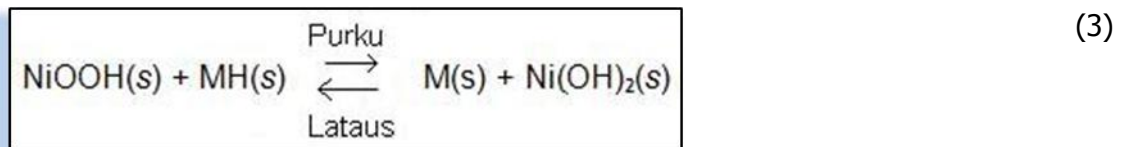
Nikkeli-metallihydridiakku (NiMH)

NiMH-akun kehitystyö aloitettiin 1970-luvulla, kun etsittiin uusia tapoja varastoida vetyä, ja se on kehittyneempi versio nikkeli-vetyakusta, jossa vety varastoitii vielä kaasumaiseen muotoon. Kuluttajamarkkinoille akku tuli kunnolla 1990-luvulla. Se on suorituskyvyiltään NiCd-akun kaltainen ja sillä on lähes samat positiiviset ominaisuudet. Erona NiCd-akulla ja NiMH-akulla on se, että NiCd-akussa negatiivisena elektrodina toimiva myrkyllinen kadmium on korvattu vedyllä, joka on imeytetty metallilejeerinkiin. Kadmiumin haitallisuuden takia NiMH-akkujen uskotaankin korvaavan pian NiCd-akut ja esimerkiksi Chrysler Epicin sähköversiossa käytetään NiMH-akkuja. Akun antavat kyseiselle autolle n. 150 km:n toimintasäteen. Muita NiMH-akkujen käyttäjiä ovat myös sähköauto Toyota RAV-EV ja hybridiautot Toyota Prius ja Honda Insight. [2, s. 138 - 141.]

NiMH-akun suurin ongelma on sen nopea itsepurkautuminen, mikä johtuu siitä, että negatiivisen elektrodin vety liukenee pikku hiljaa elektrolyyttiin ja reagoi positiivisella elektrodilla, mutta sähköautokäytössä on oletettavaa, etteivät akut usein seiso pitkiä aikoja ilman purkamista tai lataamista. Toisena ongelmana, samoin kuin NiCd-akussa, on akun muistiefekti. Tämän saa aikaan akun epätäydellinen lataaminen tai purkaminen, jolloin osa akun reaktioihin osallistuvasta aktiivisesta materiaalista jää reagoimatta. Reagoimattomassa osassa syntyy fysikaalisia muutoksia, kuten

esimerkiksi kiteiden muodostumista. Kiteet estävät aktiivisen materiaalin reagoitua seuraavalla lataus-purkauskerralla, mikä käytännössä tarkoittaa sitä, ettei akku vastaanota enempää virtaa kuin siihen on edellisillä kerroilla ladattu. Muistiefektiä voidaan kuitenkin korjata jonkin verran lataamalla ja purkamalla akku toistuvasti mahdollisimman täydellisesti.

NiMH-akun negatiivisena elektrodina toimii metalliseoksesta valmistettu levyristikko johon on imeytetty vetyä (MH). Positiivisena elektrodina toimii nikkeli, ja elektrolyytinä käytetään samoin kuin NiCd-akussa kaliumhydroksidiliuosta (KOH-liuosta), joka ei osallistu reaktioihin. Akkua purettaessa positiivisen nikkeli-elektrodin reaktio on sama kuin NiCd-akussa, eli nikkelioksihydroksidi (NiOOH) muuttuu nikkelihydroksidiksi (Ni(OH)₂). Samalla negatiivisen elektrodin vetyionit irtoavat ja tuloksena syntyy vettä. OH-ionit siis tavallaan tuhotaan negatiivisella vetyelektrodilla ja tuotetaan positiivisella nikkelioksidielektrodilla. Yhtälöstä 3 voi havaita tarkemmin NiMH-akussa tapahtuvat reaktiot.



Tähän työhön valittiin alkaliakun sovelluksista käsiteltäväksi NiMH-akku.

3.3 Virtausakut

Virtausakut, kuten sinkkihalogeeniakut (sinkkikloori- (ZnCl₂) ja sinkkibromi-akku (ZnBr₂)) ja REDOX-akut ovat lähtöaineiden edullisuuden takia olleet myös kehittelyn kohteena sähköajoneuvojen akuiksi. Ne eivät kuitenkaan ole uusi keksintö, sillä jo 1884–85 Charles Renard käytti ensimmäisenä ZnCl₂-akkuja ilmalaivassaan La France.

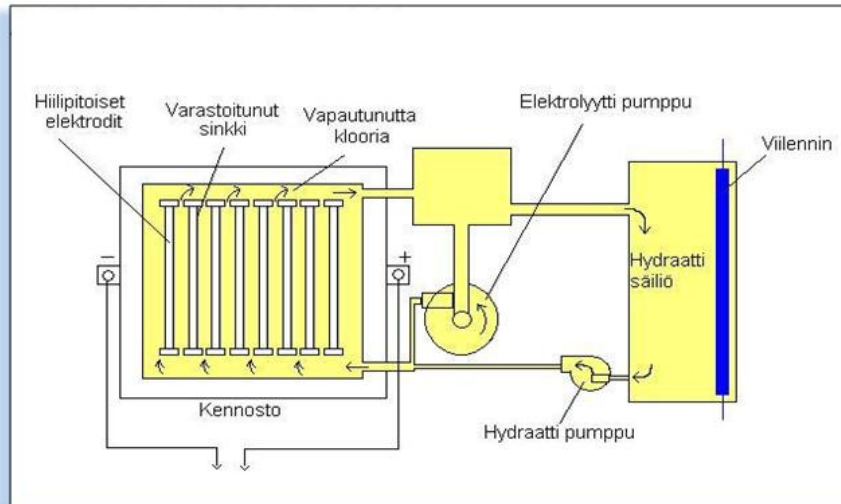
Virtausakulla tarkoitetaan akkua, jossa reagoivat aineet kierrätetään kennoston läpi vasta tarvittaessa. Samalla se sallii akun aktiivisen materiaalin säilömisen akun ulkopuolelle, mikä tekee virtausakuista erikoisia. Kaikkea akun aktiivista materiaalia ei

kuitenkaan säilötä virtaavassa elektrolyytissä, vaan ladattaessa muodostuva sinkki säilötään kennon negatiiviselle elektrodille. Virtausakun periaate on viety vielä sinkkihalogeeni-akkua pidemmälle REDOX-akuissa työllistämällä kaksi liukoista hapetusparia energian säilömiseksi. [8, s. 299 - 302.]

3.3.1 Sinkki-klooriakku ($ZnCl_2$)

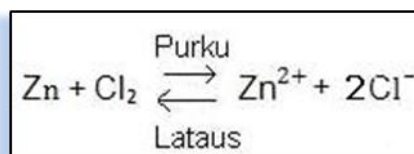
Sinkki-halogeeniakuista tunnetuimpia ovat $ZnCl_2$ -akku ja $ZnBr_2$ -akku, joista seuraavassa käsitellään esimerkkinä $ZnCl_2$ -akku. Sinkki-halogeeniakuissa metallinen sinkki toimii negatiivisena elektrodina ja positiivisena elektrodina on halogeeniliuos (kloori tai bromi). Näistä kahdesta $ZnCl_2$ -akku olisi huomattavasti korkeamman energiatiheytensä takia edullisempi sähköajoneuvokäyttöön, mutta sen ongelmana on kaasumaisen kloorin vapautuminen varausreaktiossa, minkä vuoksi järjestelmä vaatii kloorin vesiliuoksen jäähdyttämisen.

$ZnCl_2$ -akkuun ei juurikaan kiinnitetty huomiota ennen 1970-lukua, jolloin EDA (Energy Development Associates) USA:ssa ja Furukawa Electric Company Japanissa kehittivät siitä ladattavan version. Kiinnostus $ZnCl_2$ -akkua kohtaan hiipui kuitenkin jo 1980-luvun lopussa lähinnä akun monimutkaisen toiminnan takia. Toisena syynä oli kasvava kiinnostus käyttää bromia positiivisena elektrodina kloorin sijasta, sillä bromi oli helpompaa käsitellä eikä se vaadi kloorin tavoin jäähdytystä. Kuvassa 3 on esitetty sinkki-halogeeniakun toiminta, joka samalla havainnollistaa kaikkien virtausakkujen toiminnan periaatetta. [8, s. 302.]



Kuva 3. Sinkki-klooriakun toiminta akkua ladattaessa [8, s. 303]

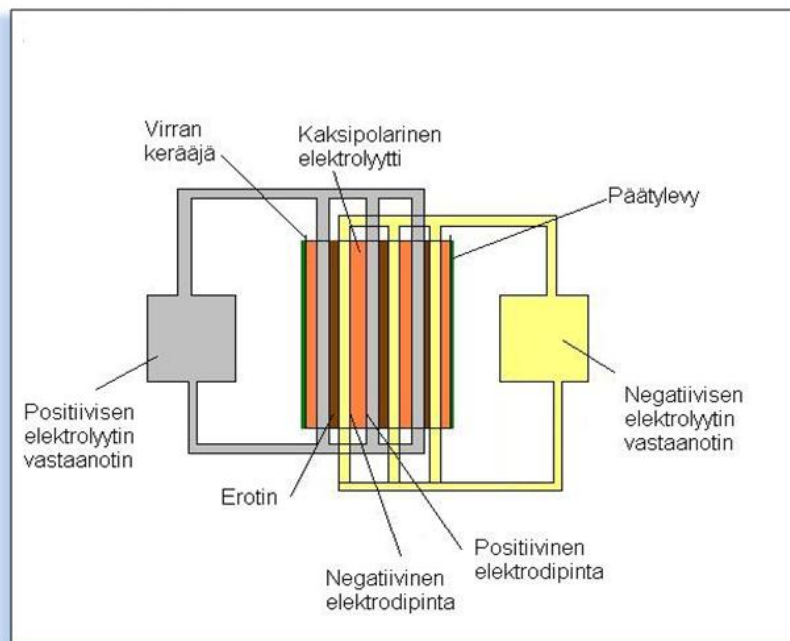
Varatussa akussa negatiivisena elektrodina on hiilestä valmistetuille levyille syntynyt sinkki ja positiiviselle elektrodille muodostunut kloorikaasu, jonka vedestä ja sinkkikloridista muodostuva elektrolyytti kuljettaa pois. Akkua purettaessa pumpun kierrättämä elektrolyytti kuljettaa kloorin positiiviselle elektrodille, jossa kloori reagoi muodostaen kloridi-ioneja. Samalla sinkki reagoi negatiivisella elektrodilla luovuttaen elektroneja ja muodostaen positiivisia sinkki-ioneja. Nämä sinkistä vapautuvat elektronit saavat aikaan sähkövirran. Kun akkua ladataan, pumpu kierrättää vedestä ja sinkkikloridista muodostuvaa elektrolyyttiä akun läpi ja reaktiot voivat tapahtua toisinpäin. Elektrolyytin positiiviset sinkki-ionit muuttuvat negatiivisella elektrodilla jälleen sinkiksi ja negatiiviset kloridi-ionit muuntuvat positiivisella elektrodilla uudelleen kloorikaasuksi. Peruskennoreaktiot on esitetty yhtälössä 4. [8, s. 303.]



(4)

3.3.2 REDOX-akku

1986 Australian University of New South Wales (UNSW) patentoi ensimmäisenä ladattavan kahteen vanadiinista valmistettuun elektrodiin perustuvan akun. Siitä lähtien Skyllas-Kazacos ja sen yhteistyökumppanit UNSW:ssä ovat kehittäneet vanadiinin hapetus-pelkistysreaktioon perustuvia akkuja eli Redox-akkuja. Myös REDOX-akut ovat virtausakkuja, ja ne on rakennettu samalla periaatteella kuin $ZnBr_2$ -akut joissa on ulkoinen astia reagoivien aineiden tallentamista varten. Toisin kuin $ZnBr_2$ -akussa, ei REDOX-akussa kuitenkaan ole metallista elektrodiä kuten sinkki eikä erillistä hapetinta kuten bromi. REDOX-akun toimintaperiaate on esitetty kuvassa 4. Akku pitää sisällään kennopakan (samantapaisen kuin sinkki-halogeniakussa), jonka lävitse kaksi reagoivaa ainetta johdetaan. Elektrodit on valmistettu grafiitilla kyllästetystä polyeteenilevyistä. Ne ovat liikkumattomia ja toimivat vain elektronien kuljetuspintana. [8, s. 319 - 321.]



Kuva 4. Vanadium REDOX-akku [8, s. 320]

Näiden akkujen energiatiheys ja kennojännite ovat kuitenkin erittäin alhaiset, mikä tekee niistä heikkoja kandidaatteja sähköauton akuksi. Positiivisena puolena REDOX-akuilla on käytännössä ikuinen elektrolyytti ja vaihdettavaksi tulevatkin eliniän lopussa

mekaaniset komponentit. Akku on myös nopea ladata ja sen hinta/kWh vähenee sitä mukaa kun akun kapasiteettia kasvatetaan.

Tähän työhön valittiin virtausakun sovelluksista käsiteltäväksi ZnCl₂-akku.

3.4 Natriumakut

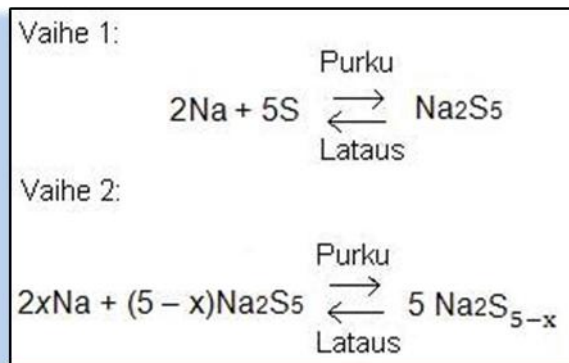
Natriumakku edustaa korkean lämpötilan akkujen ryhmää, jolla tarkoitetaan akkuja, jotka toimivat noin 300 - 400 °C:n lämpötilassa. Negatiivisena elektrodina on aina alkalimetalli (yleensä litium tai natrium), joka sulkee pois vesipohjaisten elektrolyyttien käytön, sillä alkalimetallit reagoivat erittäin voimakkaasti veden kanssa. Tilalla on käytettävä esimerkiksi liuselektrolyyttejä, suolasulaa tai kiinteitä elektrolyyttejä. Alkali-metallit mahdollistavat kuitenkin elektrodimateriaalina akuille huomattavasti korkeammat energiatiheudet. Niissä akuissa, joissa elektrolyytti on vesipohjaista, on niistä aineista, joita on mahdollista käyttää, korkein elektrodipotentiaali sinkillä. Natriumakuissa ei ole samaa rajoittavaa tekijää, koska elektrolyytti ei ole vesipohjainen. Sinkin elektrodipotentiaali on -0,76 V, mutta natriumin -2,76 V. Natrium on myös melko kevyttä, minkä johdosta esimerkiksi natrium-rikkiakun teoreettinen energiatiheys on 755 Wh/kg. Esimerkiksi lyijyakun energiatiheys on vain 252 Wh/kg ja nikkeli-kadmiumakun 244 Wh/kg [9, s. 37.14 - 37.16].

Natrium-rikkiakku (NaS)

Alkuperäinen ajatus ladattavasta NaS-akusta syntyi J.T. Kummerille hänen työskennellessään Ford Motors Companylle 1960-luvulla. Työn tuloksena syntyi beeta-akku, jonka käyttökelpoisuuden Ford demonstroi. Tämä johti lisäkehitystyöhön useissa maissa. NaS-akussa negatiivisena elektrodina on sula natrium (Na) ja positiivisena elektrodina sulaa rikki-natrium-polysulfidiseosta. Elektrolyyttinä on kiinteä β-alumina (Al₂O₃), jossa on aktiivisena Na-ioni. Natriumakkua kutsutaan myös beeta-akuksi. Juuri kiinteän elektrolyyttinsä takia natriumakku vaatii korkean lämpötilan, sillä elektrolyytti saavuttaa vaaditun ioninjohtokyvyn vasta noin 300 °C:ssa. Akun käyttölämpötila on noin 310 - 350 °C. Jos akun lämpötila laskee alle tämän, akku ei pysty enää

toimimaan. Sähköautoissa tämä tarkoittaa, että akku on pidettävä lämpimänä myös auton seistessä. Natrium ja rikki ovat akun käyttölämpötilassa nestemäisessä muodossa. [6, s. 70.]

NaS kenno puretaan kahdessa vaiheessa. Natriumionit lähtevät negatiiviselta elektrodilta, kulkeutuvat beetaelektrolyytin läpi ja päätyvät positiiviselle rikki elektrodille. Peruskennoreaktiot NaS-akussa on esitetty yhtälöissä 5 ja 6. [5, s. 174.]



(5) ja (6)

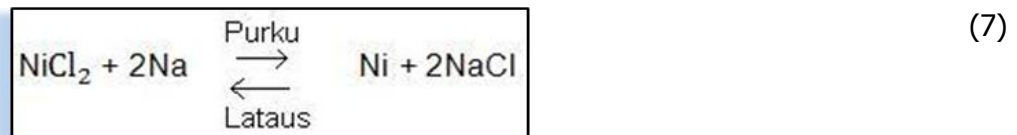
3.4.2 Natrium-metallikloridiakku (NaNi, NaFe)

Natrium/metallikloridi-akku kehitettiin 1980-luvulla Iso-Britannian tiedemiesten ja Etelä Afrikan välisessä yhteistyöprojektissa, joka sai nimen ZEBRA (**Z**eolites applied to **B**attery **R**esearch **A**frica). Monet projektiin osallistuneista tutkijoista, kuten esimerkiksi J. Coetzer, olivat olleet kehittämässä jo NaS-akkua, joten työ oli erittäin nopeaa. Vuosina 1984–85 rakennettiin muutamia sähkö-ajoneuvoja, joissa voimanlähteenä olivat ZEBRA-akut. Näistä esimerkkinä muun muassa Mercedes-Benz 190E testiauto 1984 ensimmäisellä ZEBRA-akkuilla varustetulla autolla ajettiin Iso-Britannian kaduilla. [5, s. 183.]

ZEBRA-akun ensimmäiset testaukset, joissa kennot koottiin varatussa tilassa, eivät onnistuneet, ja pian havaittiin, että akut tuli koota latauksen purkuvaiheessa. Positiivisen elektrodin piti olla ennalta muodostettu sekoitus metallijauheesta ja suolasta. Kun akkua ladattiin, nämä kemikaalit muutettiin vastaavaksi metallikloridiksi positiivisella elektrodilla ja natriumiksi negatiivisella elektrodilla. Nämä menetelmät

antoivat seuraavat edut: natriumin ei tarvinnut olla enää nestemäisessä muodossa, syntyvä natrium oli erittäin puhdasta ja tarvittavat materiaalit ovat erittäin halpoja. ZEBRA-akkujen hyvänä puolena onkin niiden raaka-aineiden halpa hinta, ja ne ovat myös NaS-akkuja turvallisempia ja pitkäikäisempiä.

Natrium-metallikloridiakku on NaS-akun johdannainen, jossa positiivisena elektrodina toimiva rikki on korvattu nikkelikloridilla (NiCl_2) tai nikkelikloridin ja rautakloridin (FeCl_2) seoksella. NaS-akun tapaan natrium toimii myös natrium-metallikloridiakussa negatiivisena elektrodina, ja elektrolyytinä on keraaminen β -alumina (Al_2O_3) kuten NaS-akussa. Peruskennoreaktiot esimerkiksi Na/ NiCl_2 -akussa ovat alla olevan yhtälön 7 mukaiset. [8, s. 385.]



Tähän työhön valittiin natriumakun sovelluksista käsiteltäväksi ZEBRA-akku eli Na/ NiCl_2 -akku.

3.5 Litiumakku

Litiumin käyttö akussa keksittiin jo 1900-luvun alussa, mutta litiumin reagoitiherkkyden takia sen kehitystyö on vienyt aikaa. Litium on metalleista kaikista kevyin, ja sillä on kaikista metalleista pienin normaalipotentiaali, minkä johdosta sillä on myös suurin reagoitiherkkyys. Nämä ominaisuudet antavat litiumakuille potentiaalisen mahdollisuuden erittäin hyvään energiatiheyteen, mikä on johtanut valtavaan kiinnostukseen litiumin käyttöä kohtaan. Litiumakun pohjalta on kehitetty monia eri sovelluksia, joista esimerkkeinä voidaan mainita korkean lämpötilan litiumakku, litiumioniakku ja litiumpolymeeriakku. Huonona puolena litiumakuilla on ollut käytöstä riippumaton ikääntyminen ja reaktioherkkyyden takia vaadittava suojaajiiri. Uusissa sovelluksissa kuitenkin vaikuttaa siltä, että jälkimmäinen ongelma on onnistuttu poistamaan. [5, s. 143; 10, s. 179.]

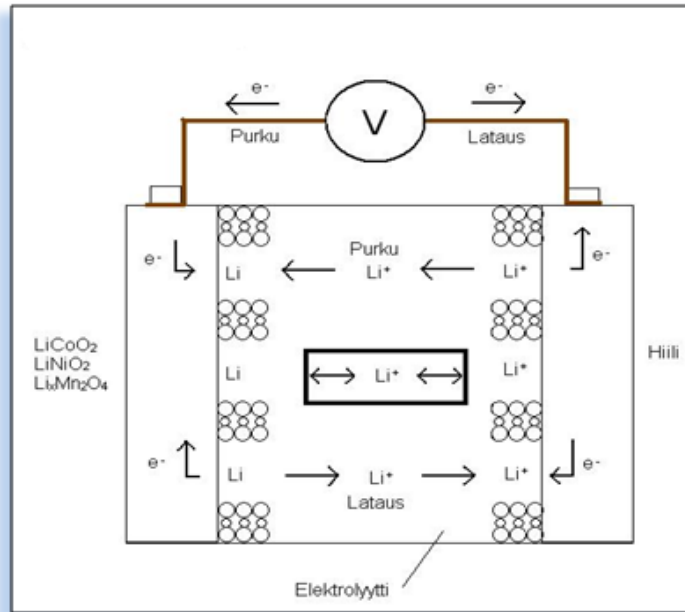
3.5.1 Litiumioniakku

1970-luvulla Oxfordin yliopiston tutkijat havaitsivat että litiumionit voidaan imeyttää kideristikoon, jossa on kolmiarvoista kobolttia tai nikkelioksidia niin, että tuloksena oli LiCoO_2 ja LiNiO_2 . Kun näitä oksideja käytettiin positiivisina elektrodeina litiummetallista tehdyn negatiivisen elektrodin kanssa orgaanisessa elektrolyytissä, saatiin tulokseksi erittäin kevyt kenno, jonka jännite oli 4 V. Pian tämän jälkeen Sony Corporation Japanissa valmisti akun, jossa litiumionit liikkusivat edestakaisin elektrodien välillä kerääntyen elektrodimateriaalin kerrosten väliin. Kehitystyön tuloksena syntynyttä kennoa kutsuttiin litiumionikennoksi. Se ei pitänyt sisällään puhdasta litiummetallia ja oli siksi paljon perinteistä litiumakkua turvallisempi. Kennon jännite oli kuitenkin enää 3 V. Litiumioniakut tulivat markkinoille ensimmäisen kerran vasta 1990-luvulla. Tämän jälkeen niiden käyttö on voimakkaasti lisääntynyt tietokoneiden, puhelimien ja kännyköiden akkuina ja nykyään niistä uutisoidaan paljon myös sähköautojen akkuina. Käynnistysakkuna litiumioniakkua on käytetty esimerkiksi Porsche Boxterissa (kuva 4).



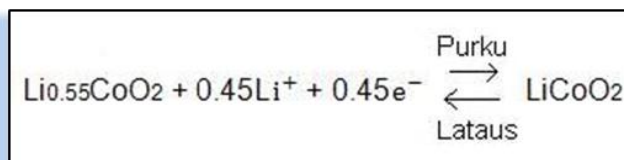
Kuva 4. Litiumioniakku [7]

Esimerkkinä litiumioniakusta on litiumioni-kobolttiakku (LiCoO_2). Tässä akussa negatiivisena elektrodina toimii hiileen varastoituva litium (Li) ja positiivisena elektrodina käytetään metallikalvon pinnalle koostettua kobolttia (Co), joka on vaihtoehtoista yleisimpänä käytössä. Litiumioniakun toimintaa havainnollistaa kuva 5.



Kuva 5. Litiumioniakun toiminta [5, s. 148]

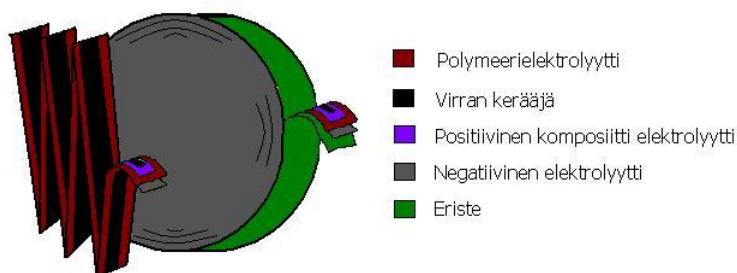
Koboltti on hinnaltaan kallista, se on luontoon päästessään myrkyllistä ja sillä on lyhyt lataus-purkauskertojen sykli-ikä. Kobolttin positiivisena puolena ovat sen avulla saavutettavat suuret energiatiheddet akussa. Muita vaihtoehtoja positiivisiksi elektrodeiksi litiumioniakussa olisivat nikkeli ja mangaani, jotka antavat litiumioniakuille hieman erilaiset ominaisuudet. Yhdistelemällä positiivisena elektrodina kobolttia, nikkeliä ja mangaania (NCM-yhdisteet), pystytään kuitenkin litiumioniakulle määrittämään halutut ominaisuudet sovelluskohtaisesti. Ongelmana kuitenkin on, että akuissa on tehtävä valinta korkean energiatihedden ja korkean kuormitettavuuden välillä. Elektrolyytinä toimii useimmiten nestemäinen litiumsuola, joita ovat esimerkiksi LiPF_6 , LiBF_4 ja LiClO_4 . LiCoO_2 -akussa tapahtuvat reaktiot voi nähdä yhtälöstä 8. [5, s. 178.]



3.5.2 Litiumpolymeeriakku

Litiumpolymeeriakku edustaa litiumioniakun toista sovellusta. Perinteinen orgaanisiin liuottimiin perustuva litiumioniakku, kuten edellä esitelty LiCoO₂-akku, sopii käytettäväksi sovelluksiin, joissa vaaditaan korkeita purkuvirtoja. Joissain tapauksissa tarvitaan kuitenkin korkeampia tehotehyyksiä ja joustavaa muotoilua. Näihin tarkoituksiin on kehitetty myös litiumioniakkuja, joissa on geeli- tai polymeerielektrolyyttiä.

Ensimmäisen kiinteäelektrolyyttisen litiumioniakku kehitettiin 1970-luvulla Ranskassa Grenoblen yliopistossa. Silloin ymmärrettiin, että ioneja, jotka pitivät sisällään polymeerejä, voitaisiin käyttää myös kiinteässä elektrolyytissä. Näin sai alkunsa litiumpolymeeriakun kehitystyö. Akussa käytetty elektrolyytti valmistetaan yleensä sekoittamalla valittu litiumsuola polyetyleenioksidin joukkoon. Litiumpolymeeriakussa on negatiivisena elektrodina ohut litiumkalvo, positiivisena elektrodina taas on kalvo, joka on valmistettu vanadiinista ja mangaanista. Nämä kalvot muodostavat kennot. Niitä voidaan muun muassa taittaa tai rullata päällekkäin, kunhan väliin vain asetetaan eristekalvo (kuva 6). Esimerkiksi Ultralife Batteries, Inc. valmistaa kiinteäpolymeerisiä litiumioniakkuja. Näiden akkujen kennojen paksuus vaihtelee 3,2 ja 6 millimetrin välillä, mutta kennot, joiden paksuus on vain 1,0 mm, ovat mahdollisia. [5, s. 155 - 158.]



Kuva 6. Litiumpolymeeriakku [5, s. 155]

Tähän työhön valittiin litiumakun sovelluksista käsiteltäväksi litiumioni-kobolttiakku (LiCoO₂).

4 Vaadittavat ominaisuudet

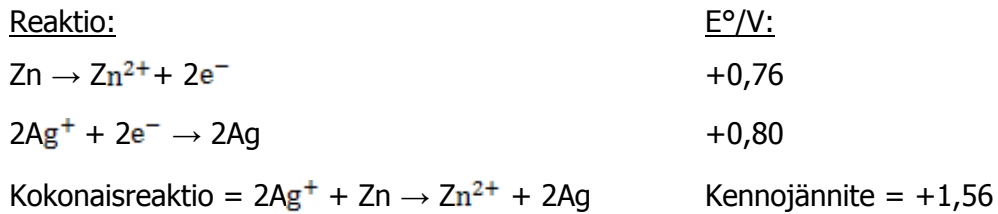
Jotta sähköauto olisi todella kilpailukykyinen vaihtoehto polttomoottoriautoille, on sen suorituskyvyn ja ominaisuuksien yllettävä lähes samaan tai jopa polttomoottoriautoja parempiin tuloksiin. Kehitystä tarvitaan vielä useilla osa-alueilla, mutta ne kaikki riippuvat sähköajoneuvon voimanlähteestä eli akuista. Seuraavassa osiossa tarkastellaan valittujen ja edellä esitettyjen akkujen ominaisuuksia näiden kehityskohtien näkökulmasta ja pyritään selvittämään, mistä kyseiset ominaisuudet kemiallisesti muodostuvat. Tutkimus keskittyy kuitenkin tarkastelemaan vain reagoivien aineiden ominaisuuksia, ei esimerkiksi kennomateriaalien vaikutusta.

Ajomatka

Sähköauton mahdollisen ajomatkan määrittää se, kuinka paljon energiaa auton akuista saadaan purettua ulos. Akun suorituskykyyn vaikuttavat akun paino ja koko, minkä johdosta akkujen energiapitoisuuksista puhuttaessa käytetään termiä energiatiheys. Hämeenoja määrittelee kirjassa "Akkuopas" energiatihyden seuraavasti:

Akuista käytetty tunnussuure, joka ilmoittaa, paljonko energiaa akusta saadaan tietyllä purkausvirralla painoyksikköä tai tilavuusyksikköä kohden (Wh/kg tai Wh/dm^3) [6, s. 5].

Energiatiheys kertoo, kuinka paljon energiaa kyseiseen akkuun voidaan varastoida yhtä kilogrammaa kohti. Koska teho (W) riippuu jännitteestä (U) ja virrasta (I), vaikuttaa akun elektrodien potentiaalien välinen jännite suoraan akun energiatihyteen. Normaalipotentialien taulukko (liite 1) kuvaa näitä jännitteitä suhteessa vetyyn. Valittujen elektrodien synnyttämä teoreettinen kennojännite voidaan siis suoraan laskea taulukon pohjalta. Alla olevassa laskussa on esitetty yksinkertainen esimerkki sinkin ja hopean synnyttämästä kennojännitteestä.



Koska kennojännite riippuu myös lämpötilasta ja elektrolyytin vahvuudesta, tulee todellinen kennojännite mitata kuormittamattoman kennon elektrodien väliltä. Jos valitaan positiiviseksi elektrodiksi mahdollisimman elektronegatiivinen ja kevyt aine (esim. kevyemmät halogeenit (F_2 , Cl_2), happi tai rikki) ja negatiiviseksi elektrodiksi mahdollisimman elektropositiivinen ja kevyt aine (esim. vety, litium tai natrium) saadaan parhaat mahdolliset teoreettiset energiatiheydet (liite 1). Käyttämällä litiumia ja fluoria elektrodeina saataisiin kenno, jonka teoreettinen jännite olisi 5,91 V. Tällaisen kennon teoreettinen energiatiheys olisi noin 6000 Wh/kg, sillä sekä litium että fluori ovat hyvin kevyitä alkuaineita. Litiumin ja fluorin käyttäminen elektrodiparina olisi kuitenkin haastavaa, sillä molemmat aineet ovat erittäin reaktioherkkiä, mikä tekee niiden hallinnasta vaikeaa. Tarvittaisiin myös hyvin johtava elektrolyytti, joka sopisi molempien elektrodimateriaalien kanssa käytettäväksi. Materiaalien tulisi myös kestää useita lataus-purkauskertoja sekä toimia kaikissa ulkoilman lämpötiloissa. Alla olevassa taulukossa (taulukko 1) on lueteltu tässä työssä käsiteltävien akkujen teoreettiset energiatiheydet. Akkujen alkuaineita verrataan myöhemmin jaksolliseen järjestelmään elektrodien perusteella. $ZnCl_2$ -akulla on tutkituista akuista paras energiatiheys, mutta akun suorituskyvyn kannalta energiatiheys ei ole kaikki kaikessa.

Taulukko 1. Akkujen teoreettiset energiatiheydet [10, 37.14 - 37.16; 11, s.169; 3, s. 66]

Akku	Teoreettinen energiatiheys (Wh/kg)
Lyijyakku (AGM-akku)	161
NiMH-akku	240
$ZnCl_2$ -akku	833
ZEBRA-akku (Na/NiCl-akku)	787
Litiumioniakku ($LiCoO_2$ -akku)	360

4.2 Akun lataus

Sähköauton akun latausnopeus riippuu ensinnäkin siitä, kuinka suuri ladattava akku on eli kuinka paljon energiaa se voi ottaa vastaan. Kuitenkin joidenkin akkutyypin lataus vie kauemmin kuin toisen yhtä tehokkaan akun. Hämeenajan kirjassa "Akkuopas" mainitaan lyijyakun varaamisnopeutta rajoittavaksi tekijäksi se, ettei akun jännite saa nousta liian korkeaksi. Jännitteen noustessa liian korkeaksi akussa alkaisi tapahtua kaasunkehitysreaktioita ja akun lämpötila nousisi liian korkeaksi [6, s. 55]. Akun lämpeneminen johtuu sen läpi johdettavan virran kohtaamasta vastuksesta eli akun sisäisestä vastuksesta. Sisäinen vastus (resistanssi) määräytyy akun elektrodimateriaalien, elektrolyytin ja erottimien ominaisvastuksista. Myös akun positiivisen ja negatiivisen elektrodin välinen etäisyys eli elektronien kulkema matka vaikuttavat ominaisvastukseen. Mitä suurempi sisäinen resistanssi akulla on, sitä pienemmällä virralla sitä joudutaan yleensä lataamaan kuumenemisen välttämiseksi. Autoalan Koulutuskeskus Oy:n järjestämällä Autotekniikan ja elektroniikan päivillä (9.-10.2.2010) käsiteltiin AGM-akun sisäistä vastusta, joka voidaan mainita tässä esimerkkinä:

AGM-akkujen suurempi virranantokyky ja latausvirran vastaanottokyky johtuu paljolti muun muassa sen levyjen läheisyydestä ja suuresta koosta johtuvasta pienestä sisäisestä resistanssista.

- *Esim. Optima*
- *Sisäinen resistanssi n. 3 mΩ*
- *Max. pikalatausvirta jopa 300 A. [7]*

Toinen rajoittava tekijä akun lataukselle on sähköjakeluverkko. Verkosta saatava maksimiteho on vakio, koska normaalista pistorasiasta saadaan ulos keskimäärin 230 V:n jännite ja sulakkeet ovat yleensä kotitalouksissa 16 ampeerin sulakkeita. Jos akun sisäinen vastus on riittävän alhainen, latausta rajoittaakin virran saanti verkosta akun sisäisen resistanssin sijaan. Tämä on johtanut pikalatausjärjestelmien kehittämiseen. Suomessa myynnissä olevista latauspisteistä voi mainita esimerkkinä Enston latauspisteet. Käytössä olevasta sähköauton latauspisteestä löytyy esimerkki tällä

hetkellä Helsingistä, kauppakeskus Kampin vierestä (kuva 7). Suunnitteilla on myös tehdä Turusta Loviisaan johtavasta tiestä niin kutsuttu ”vihreä moottoritie”, jonka varrella olisi sähköautoille latauspisteitä [12]. Latausjärjestelmällä on toinenkin tarkoitus sähköajoneuvoissa: sitä tarvitaan kontrolloimaan latausprosessia akkujen vaurioitumisen estämiseksi [13, s. 10].



Kuva 7. Helsingin Energian sähköauton latauspiste

Alla olevaan taulukkoon on kerätty tutkimukseen valittujen akkujen teoreettiset latausajat. Niitä verrataan elektrodimateriaalien perusteella jaksolliseen järjestelmään osiossa 5, mutta kannattaa kuitenkin muistaa, että ne ovat vain yksi akun sisäiseen vastukseen vaikuttava tekijä.

Taulukko 2. Tutkittujen akkujen teoreettiset latausajat [10, 37.14 - 37.16]

Akku	Latausaika/h
Lyijyakku (AGM-akku)	8 - 24
NiMH -akku	1 - 2
ZnCl ₂ -akku	6 - 10
ZEBRA-akku (Na/NiCl-akku)	3 - 6
Litiumioniakku (Li-C/CoO ₂ -akku)	2,5

4.3 Kestoikä

Akkujen kestoikä määritellään yleensä kahdella eri tavalla, vuosina tai mahdollisten lataus-purkauskertojen määränä eli sykli-ikä [2, s. 31]. Riippumatta esitystavasta kemiallinen väsyminen akussa on kuitenkin aivan sama. Kun akussa syntyy reaktioiden sivutuotteita, ei akku enää kykene vastaanottamaan samaa määrää virtaa kuin uutena.

Alla olevaan taulukkoon 3 on kerätty tutkimukseen valituista akuista teoreettiset kestoajat sykleinä. Niitä verrataan elektrodimateriaalien perusteella jaksollisessa järjestelmässä muihin tutkittuihin akkuihin osiossa 5.

Taulukko 3. Tutkittujen akkujen teoreettinen sykli-ikä/kenno [10, 37.14–37.16; 6, s. 66]

Akku	Sykli-ikä / kenno
Lyijyakku (AGM-akku)	800
NiMH-akku	900
ZnCl ₂ -akku	500
ZEBRA-akku (Na/NiCl-akku)	2500
Litiumioniakku (LiCoO ₂ -akku)	1000

Kemiallisen väsymisen aiheuttavia tekijöitä on useampia. Näitä ovat muun muassa syväpurkautuminen, ylilataaminen, lämpötilan vaihtelut, elektrolyytin väkevöityminen ja joidenkin akkujen kohdalla akkujen käytöstä riippumaton väsyminen (litiumioniakku).

Syväpurkautuminen

Akun syväpurkautumisella tarkoitetaan tilannetta, jossa akku on purettu alle sallittujen purkausjänniterajojen tai täysin tyhjäksi pienellä virralla [6, s. 75]. Muun muassa kaikki lyijyakut tulisi säilyttää täyteen varattuina, jotta estetään lyijysulfaatin kiteytyminen. Syväpurkautumista on käsitelty tarkemmin lyijyakun yhteydessä.

Ylilataaminen

Akun ylilataamisella tarkoitetaan tilannetta, jossa akun läpi johdetaan virtaa, vaikka se on jo latautunut täyteen. Tämä aiheuttaa akussa lämpöä ja sivureaktioita. Suljetuissa

akuissa tämä lyhentää usein akun elinikää ja on jopa vaarallista, sillä se synnyttää akkuun myös painetta. Vaikka akussa tätä varten olisikin paineventtiili, väkevöittää se elektrolyyttiä ja akun käyttöikä lyhenee. [7.]

Lämpötilan vaihtelut

Lämpötilan laskiessa elektrolyytin olomuoto muuttuu kiinteämpään suuntaan ja ionien kulku liuoksessa on sitä vaivalloisempaa mitä alemmas lämpötila laskee. Tästä syystä akku ottaa vastaan virtaa sitä heikommin, mitä alhaisempi lämpötila on. Alhaisessa lämpötilassa akussa pääsee myös herkemmin syntymään kiteitä aktiivisen materiaalin pinnalle. Akun lämpötilanvaihteluiden kestävyys riippuu lähes täysin akkuun valituista materiaaleista ja niiden olomuodoista. Esimerkiksi NaS-akussa natrium on pidettävä aina nestemäisessä muodossa, sillä kiinteytyessään natrium ei enää reagoi tarkoituksenmukaisesti eikä akku enää toimi. [8, s. 355 - 357.]

Elektrolyytin väkevöityminen

Elektrolyytin väkevöityminen on todellisuudessa seuraus jo tapahtuneesta vahingosta, kuten esimerkiksi akun yllilataamisesta tai akun lataamisesta liian suurella virralla. Kummassakin tilanteessa akku kehittää lämpöä. Esimerkiksi lyijyakussa se johtaa veden höyrystymiseen ja siten akusta poistumiseen. Tämä johtaa elektrolyytin väkevöitymiseen. Tilanne on ongelmallinen etenkin suljetuissa lyijyakussa, sillä niihin ei voi lisätä vettä elektrolyytin laimentamiseksi. [7.]

Käytöstä riippumaton väsyminen

Käytöstä riippumaton väsyminen, joka vaivaa muun muassa litiumioniakkua, johtuu siitä että akkuun pääsee ajan kuluessa sen suljetusta rakenteesta huolimatta ulkopuolelta aineita, jotka saavat akussa aikaan sivureaktioita. Sivureaktioiden tuotteet haittaavat akun aktiivisen materiaalin reagointia ja siten lyhentävät sen elinikää.

4.4 Hinta

Yksi tapa arvioida akun hintaa on arvioida tarvittavien lähtömateriaalien kustannukset. Tähän arviointitapaan sisältyvät myös tarvittavien materiaalien tuotanto- ja käsittelykustannukset. Muita tapoja hinnan arvioimiseksi ovat syklikertojen hinnan määrittäminen (€/sykli) tai akun eliniän aikana saatavan wattimäärään pohjautuva hinnoittelu (€/Wh_{kok}). Myös akun lataamisen, huollon ja tarvittavien lisävarusteiden aiheuttamia kustannuksia tulisi arvioida kokonaiskustannuksia vertailtaessa. Koska nämä asiat eivät ole mitenkään sidottuja akun elektronien määrään tai niiden atomimassaan, ei akkujen hintaa edes yritetä arvioida jaksolliseen järjestelmään perustuen. Koska akkujen hinta on kuitenkin sähköauton kilpailukyvyyn kannalta erittäin tärkeä tekijä, on seuraavaksi käyty lyhyesti läpi tutkittujen akkujen hintataso ja sen syy. Taulukkoon 4 on kerätty tutkituille akuille määritellyjä hintoja.

Taulukko 4. Tutkittujen akkujen hintoja/kWh [8, s. 99]

Akku	Hinta €/kWh
Lyijyakku (AGM-akku)	90–112
NiMH-akku	150–260
ZnCl ₂ -akku	300–335
ZEBRA-akku (Na/NiCl-akku)	170–360
Litiumioniakku (Li-C/CoO ₂ -akku)	150

Lyijyakku

Lyijyakku on akuista selvästi halvin. Lähtömateriaalit ovat edullisia, mutta hintaan vaikuttavat myös muut syyt. Lyijyakun valmistuskustannukset ovat alhaiset. Lisäksi lyijyakku on saavuttanut markkinoilla suuren yleisön suosion, mikä on taannut sille suuret valmistuserät ja siten massatuotannon tuoman hintaedun. Vuoden 2010 aikana lyijyn hinta liikkui 1,30 €/kg ja 1,90 €/kg välissä (liite 3, kuva 1). Lyijyakun yhden kennon kohtalaisen suuri jännite (2 V) on myös mahdollistanut sen, että esimerkiksi 12 voltin ajoneuvon akkuun niitä tarvitaan vain kuusi kappaletta. Tämä myös laskee osaltaan materiaalikustannuksia. [14, s. 11.]

Nikkeli-metallihydridiakku

NiMH-akku ei myöskään ole raaka-aineiltaan kallis akku. Lyijyakuun verrattuna negatiivisen elektrodin hinta on silti kymmenkertainen. Vuoden 2010 aikana nikkelin hinta liikkui 12 €/kg ja 20 €/kg välillä (liite 3, kuva 2). Yksi NiMH-akun hintaa nostavista tekijöistä on sen kennojen alhainen jännite (1,2 V). Jotta akulle saadaan käyttöjännitteeksi 12 V, on kennoja oltava kymmenen. NiMH-akun on todettu kuitenkin olevan lyijyakkua pitkäikäisempi, ja sillä on korkeampi energiatiheys. Toisaalta taas alkaliakkujen rajallinen toimintalämpötila aiheuttaa lisäkustannuksia lisälaitteiden muodossa. [11, s. 641.]

Sinkki-klooriakku

Vuoden 2010 aikana sinkin hinta liikkui 1,35 €/kg ja 1,85 €/kg välillä (liite 3, kuva 3). Sinkki on siis samassa hintaluokassa lyijyn kanssa, mutta ZnCl₂-akun hintaa nostaa järjestelmän monimutkaisuus. Akun varausreaktiossa vapautuu kaasumaista klooria, minkä johdosta järjestelmä vaatii kloorin vesiliuoksen jäädyttämisen. Jäähdytysjärjestelmä lisää osaltaan akun valmistuskustannuksia.

ZEBRA-akku (Na/NiCl₂-akku)

Natriumia on luonnossa helposti saatavilla, mikä laskee natriumin tuotantokustannuksia ja siten myös sen hintaa. Nikkelin hinta liikkui vuoden 2010 aikana välillä 12 €/kg ja 20 €/kg (liite 3, kuva 2). Pidemmällä aikavälillä natriumakun hintaa laskee sen erittäin korkea energiatiheys ja pitkä sykli-ikä verrattuna muihin akkuihin. Kustannuksia nostaa kuitenkin se, että akkujen tuotanto on rajoitettu isoihin yksiköihin eikä pienempiä voida tuoda markkinoille niin, että voitaisiin olla varmoja niiden vakaasta toiminnasta. Tästä johtuen akkujen kustannuksia ei vielä laske massatuotannon tuoma hinta etua. [5, s. 183.]

Litiumioniakku (LiCoO₂-akku)

Litiumioniakun hintaa nostaa positiivisen elektrodin materiaalina usein käytetty koboltti. Vuoden 2010 aikana koboltin hinta liikkui 27 €/kg ja 40 €/kg välissä (liite 3, kuva 2).

Akun kennojännite on kuitenkin korkea (4,1 V), minkä johdosta kennoja tarvitaan vähemmän. Toinen hintaa nostava tekijä on litiumin reaktiivisuus, minkä vuoksi akkuihin on tarpeen rakentaa suojavirtapiiri, sillä jokaista kennoa on vahdittava ladattaessa erikseen. [15, s. 641.]

4.5 Turvallisuus

Samoin kuin polttomoottoriautoissa, myös sähköautoissa turvallisuus on ehdottoman tärkeää. Sen vuoksi turvallisuusnäkökohdat käydään seuraavassa lyhyesti läpi. Autokäyttö asettaa akuille omat turvallisuuskriteerinsä: käytettävän akun tulee kestää vaaraa aiheuttamatta lämpötilojen vaihteluita, ravistusta ja heilumista, yllilatauksen mahdollisuus ja vika virtapiirissä, sekä kolari tilanne ja ympäriaajo. Alla on käyty läpi turvallisuuteen liittyviä ongelmia akkukohtaisesti.

Yhtenä yhteisenä ongelmana kaikille sähköautojen akuille on niiden lataamisen ja purkamisen aiheuttamat ongelmat. Siksi nykyajan akustot tarvitsevat sähköajoneuvokäytössä akkujen hallintaan järjestelmän, joka tunnetaan nimellä BMS-piiri (Battery Management System). BMS-piirin tehtävänä on säilyttää akkujen toiminta vakaana turvallisuuden takia. Mahdollinen ylivirtakuorma, ylijännite, oikosulku tai akun liian korkea lämpötila voisivat saada aikaan vaaratilanteen. Jokaiselle kennolle on järjestelmässä oma mikroprosessori, ja yhdessä ne tasaavat kennojen virtapiikkejä sekä informoivat ohjainyksikköä akkujen tilasta. Näin lisätään huomattavasti akkujen turvallisuutta sähköautokäytössä. [13, s. 10.]

Lyijyakku

Vaikka lyijyakkua pidetään erittäin turvallisena akkuna, on senkin käytössä tiettyjä turvallisuusnäkökohtia otettava huomioon. Akun elektrolyytti sisältää happoa, joka on syövyttävää ja saattaa läikkyä avoimesta lyijyakusta akkua siirrettäessä. Ilman akun väärinkäyttöä tai valmistusvikaa, lyijyakuissa ei tämän lisäksi muita turvallisuusriskejä olekaan. Lyijyakkua ylliladattaessa syntyy akun reaktioissa vetyä ja happea. Vetyä syntyy maksimissaan 0,42 l ja happea 0,21 l yhtä yllilatauksen ampeerituntia kohti. Näiden kaasujen muodostama seos on räjähdysherkkää kun vety saavuttaa 4 prosentin

osuuden ilman koostumuksesta. Ylilataus saattaa johtaa myös myrkyllisten kaasujen syntymiseen akussa. Joidenkin lyijyakkujen levymateriaalit sisältävät antimonin ja arseenin, joita käytetään kovettamaan levyn verkkoa ja estämään sen korroosiota. Kun ylilatauksessa syntyvä vety pääsee kosketuksiin näiden metallien kanssa, syntyy arseenivetyä (AsH_3) ja antimonivetyä (SbH_3). Nämä kaasut eivät yleensä muodosta ongelmaa, koska ne poistuvat samasta venttiilistä, joka on kehitetty vedyn ja hapen poistoon. Ne voivat kuitenkin aiheuttaa sairautta ja jopa kuoleman. [10, s. 23.77.]

Nikkeli-metallihydridiakku

NiMH-akut ovat yleisesti ottaen lyijyakkujen tavoin erittäin turvallisia ja aiheuttavat vaaratilanteita lähinnä vain väärin käytettäessä tai rikkoutuessaan. Jos akut altistetaan korkeille lämpötiloille tai ne yliladataan, saattavat kennot purkautua. NiMH-kennot vapauttavat purkautuessaan vetyä, joka ilman kanssa kosketuksiin päästessään muodostaa räjähdysalttiin seoksen. Niinpä kaasujen kerääntyminen tuleekin estää ja akkujen säilytystä ilmatiiviissä tilassa tulee välttää. Akut tulee myös suojata kipinöiltä, mikä esimerkiksi akkulaturia käytettäessä tarkoittaa huolellisuutta kaapelien kytkemisessä ja irrottamisessa. [10, s. 29.32.]

Sinkki/kloori-akku

ZnCl_2 -akun turvallisuusriskinä on kloori, joka vapaana alkuaineena on hyvin myrkyllistä. Hengitettynä se ärsyttää limakalvoja ja nestemäisenä se on syövyttävää. Kloorihydraatti taas on vakaa yhdiste, joka ei ole vaarallinen kunhan se säilytetään alle $10\text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa. Luonnollisesti ZnCl_2 -akun lämpötila nousee kuitenkin akun seistessä tätä korkeammaksi. Asia on ratkaistu syöttämällä tarvittava kloori kennoon ja antamalla sen reagoida negatiivisen sinkin kanssa. Tästä syntyy akussa jonkin verran itsepurkautumista, mutta näin saadaan estettyä kloorin vapautuminen ilmakehään. Factory Mutual on tehnyt ZnCl_2 -akuista turvallisuustarkastuksen, jossa käytiin läpi akun toimintaa kolaritilanteissa. Tarkastuksen lopputulos oli yllättävä; ZnCl_2 -akusta vapautuva kloori ei aiheuta kuljettajalle yhtään sen suurempaa vaaraa kuin polttomoottoriautoissa polttoaine. Tästä tuloksesta huolimatta on kuitenkin vielä kyseenalaista hyväksyvätkö kuluttajat jäädytettyä klooria sisältävän akkujärjestelmän turvalliseksi. [8, s. 304.]

ZEBRA-akku

ZEBRA-akun (esimerkiksi Na/NiCl₂-akun) turvallisuusongelmana on sen sisältämä natrium. Natrium, joka on alkalimetalli, reagoi veden kanssa kosketuksiin päästessään erittäin voimakkaasti synnyttäen vetykaasua ja voisi kolaritilanteessa näin aiheuttaa akun räjähdysten. ZEBRA-akun suurimpana ongelmana onkin ollut juuri sen turvallisuus [8, s. 405]. Akkua suunniteltaessa on pyritty ottamaan huomioon ongelmien estäminen onnettomuustilanteissa, oikosulkujen välttäminen ja ulkopuolisten aineiden aiheuttamien reaktioiden minimoiminen akussa. Näihin päämääriin on pyritty seuraavilla parannuksilla:

- valmistusmateriaaleiksi on valittu aineita, jotka reagoivat huonosti muiden akun aineiden kanssa ja joilla on korkea sulamispiste.
- natriumin virtausta elektrolyyttiin on rajoitettu ja tiivisteiden heikkoihin kohtiin on keskitytty. Näin on saatu riskilämpötilaa (yli 100 °C astetta) pienennettyä.
- on lisätty lämpö- ja sähkösulakkeita estämään mahdollisen katastrofin kulkua.
- akku on suojattu luonnonvoimilta lämpösuojaalla. [10, s. 35.60, 35.70, 40.21.]

Litiumioniakku

Litiumioniakku on suhteellisen turvallinen akku. Se sotketaan yleensä litiumakkuun, jossa negatiivisella elektrodilla on litium metallia. Litium on natriumin tavoin alkalimetalli ja reagoi erittäin herkästi päästessään kosketuksiin veden kanssa. Litiumioniakussa taas ei ole litiummetallia, vaan kuten jo aikaisemmin todettiin, litiumioneja, jotka kulkevat positiiviselta elektrodilta negatiiviselle ja toisin päin.

Litiumioniakkujen turvallisuutta testaavat monet eri tahot, joista esimerkkinä mainittakoon sotilaalliset tahot. Ne kehittävät standardeja ja testausmenetelmiä litiumioniakuille, jotta akkujen turvallisuus saataisiin taattua. Testausmenetelmät ovat seuraavia:

- oikosulkutesti
- naula testi, jossa akkuun lyödään rautanaula
- lämpötesti, jossa akku lämmitetään 150 °C asteeseen

- akun murskaustesti
- törmäystesti
- ylilataustesti.

Näissä testeissä ei ole havaittu vuotoja lämpötestin yhteydessä, ja sekä murskaustestissä että törmäystestissä akkujen lämpötila oli noussut viideksi minuutiksi 116 °C:seen, minkä jälkeen ne viilenivät. Huomattavaa on, etteivät akut missään näissä testeissä purkautuneet väkivaltaisesti (syttyneet tuleen) ja venttiilimekanismi päästi paineet aivan niin kuin ne on suunniteltu päästämään. [10, s. 35.70.]

4.6 Kierrätys

Akkujen tehon ja hinnan lisäksi täytyy laajempaan kulutukseen tuotettavien akkujen kohdalla ajatella myös niiden hävittämisprosessia. Jo akkua suunnitellessa tulee ottaa huomioon sen kierrättäminen luontoystävällisesti. Osa alkuaineista, kuten kadmium, ovat luonnostaan myrkyllisiä, ja osa taas saa myrkyllisiä ominaisuuksia yhdistyessään toisiin aineisiin. Vaikka kemiassa voidaan päätellä yhdiste, joka syntyy kun kahta ainetta yhdistetään, ei syntyvien yhdisteiden ominaisuuksia voida kuitenkaan päätellä. Jonkin verran voidaan päätellä toisten samankaltaisten aineiden yhdisteiden ominaisuuksista, mutta todelliset ominaisuudet on käytännössä aina testattava. Seuraavassa käydään läpi muutaman tässä työssä tutkitun ja markkinoilla yleisimmän akun kierrätysmenetelmä pääpiirteissään.

Lyijyakku

Lyijyakku luokitellaan ongelmajätteeksi sen sisältämän lyijyn takia ja sen kierrätys tapahtuu erottelemalla ensin sen sisältämät pääaineet toisistaan. Kun lyijyakku kierrätetään, murskataan se niin sanotussa vasaramyllyssä, jonka jälkeen palaset kaadetaan altaaseen, joka sisältää nestettä. Akkujen muovi (yleensä polypropeeni) jää kellumaan pintaan, ja raskaat metallit vajoavat pohjaan, minkä jälkeen polypropeeni voidaan kerätä talteen. Seuraavaksi altaan neste valutetaan talteen jatkokäsittelyä varten. Raskaat metallit ovat jääneet altaan pohjalle, josta ne voidaan kerätä omaa

jatkokäsittelyään varten. Polypropeenin jatkokäsittely on melko yksinkertainen: kerätyt muovin palaset pestään ja kuivataan, minkä jälkeen ne lämmitetään helposti käsiteltävään muotoon ja puristetaan muotin läpi pelleteiksi. Sen jälkeen ne voidaan taas uusiokäyttää. Akun lyijyä sisältävien osien käsittely on hiukan monimutkaisempaa. Ensin osat puhdistetaan ja sulatetaan masuunissa. Sitten sulanut lyijy kaadetaan harkkomuotteihin ja hetken kuluttua pintaan nousevat metallin epäpuhtaudet voidaan kaapia pois lyijyn seasta. Tämän jälkeen lyijyn annetaan jäähtyä ja jähmettyä muoteissa. Tulokseksi saadaan puhtaita lyijyharkkoja, jotka voidaan palauttaa takaisin kiertoon. Polypropeenin ja lyijyn käsittelyn jälkeen jäljellä jää enää lyijyakun elektrolyytineste, joka sisältää rikkihappoa. Hapon voi kierrättää kahdella eri tavalla. Toisessa menetelmässä lisätään akkunesteeseen teollista kemikaalia, joka neutraloi akun muuttamalla hapon vedeksi. Sen jälkeen vesi käsitellään vedenkäsittelylaitoksessa. Toisessa menetelmässä happo muutetaan natriumsulfaatiksi, jota on esimerkiksi pyykinpesuaineissa. Jos lyijyakku rikkoutuu ja siitä vuotaa maahan happoa, neutralointiin käytetään yleisesti vetykarbonaattiliuosta eli ruokasoodaliuosta (100 g/l vettä). Neutralisoinnin jälkeen alue pitää huuhdella vedellä. [16.]

Nikkeli-metallihydridiakku ja litiumioniakku

NiMH-akut ja litiumioniakut kierrätetään niin kutsutussa HTMR-prosessissa eli korkean lämpötilan prosessissa. Akut avataan ja kennot poistetaan, minkä jälkeen akuista jäljelle jäävä metalliseos sulatetaan masuunissa niin, että kaikki korkean lämpötilan metallit (esimerkiksi nikkeli, koboltti ja mangaani) sulavat. Metalliseoksen sulaessa matalan lämpötilan metallit erottuvat ja ne kerätään pois metallioksideina. Tämän jälkeen seos jäädytetään. Litiumioni- ja litiumpolymeeriakuissa kerätään talteen metallipitoinen sisältö (koboltti, nikkeli ja kupari). NiMH-akkujen kierrätyksessä keskitytään nikkelin puhdistamiseen. Koska NiMH-akkuja pieniksi paloiksi leikatessa on vedyn karkaaminen mahdollista, täytyy prosessia tarkkailla. Kun muovinen suojuus on poistettu, jäljelle jää tuote joka sisältää suuren määrän nikkeliä, joka on teräksen valmistuksessa metalliseoksen yksi tärkeä osa. [16; 17.]

5 Ominaisuudet jaksollisessa järjestelmässä

Taulukkoon 5 on kerätty tutkittujen akkujen ominaisuuksia. Nämä ominaisuudet eivät kuitenkaan kerro kaikkea kyseisen akun toiminnasta. Akuilla saattaa olla vertailun ulkopuolelle jääviä ominaisuuksia, jotka tekevät niistä huonoja vaihtoehtoja sähköautojen akuiksi. Tarkoituksena on tutkia, erottuuko jokin jaksollisen järjestelmän osa edukseen tutkitun ominaisuuden kannalta.

Ominaisuuksista vertaillaan jaksollisessa järjestelmässä (liite 4) elektrodiparien kautta vain ajomatkaan vaikuttavaa energiatiheyttä sekä saavutettua latausaikaa ja akkujen sykli-ikä. Akkujen hintaa, turvallisuutta ja kierrätystä ei verrata, sillä niihin vaikuttavat liian voimakkaasti ulkoiset tekijät. Koska valituilla akuilla on elektrodipareissa jonkin verran samoja aineita, on jokaisesta parista merkitty tulokset omiin taulukoihinsa.

Taulukko 5. Tutkittujen akkujen ominaisuuksia

Akku → Ominaisuus	Lyijyakku	NiMH-akku	ZnCl ₂ -akku	ZEBRA-akku (Na/NiCl-akku)	Litiumioniakku (LiCoO ₂ -akku)
Energiatiheys (Wh/kg)	161	240	833	787	360
Latausaika (h)	8-24	1-2	6-10	3-6	2,5
Sykli-ikä	800	900	500	2500	1000

5.1 Ajomatka

Sähköautossa ajomatka yhdellä latauksella on riippuvainen akkujen energiatiheydestä. Seuraavassa on asetettu tutkittujen akkujen elektrodiparit jaksolliseen järjestelmään korkeimman energiatiheyden omaavasta akusta matalimman energiatiheyden omaavaan akkuun (taulukko 6). Koska akuissa käytetään jonkin verran samoja aineita, on jokainen elektrodipari sijoitettu omaan jaksolliseen järjestelmäänsä vertailun helpottamiseksi (liite 5, kuva 1).

Taulukko 6. Tutkitut akut energiatihedyyden mukaisessa järjestyksessä

Energiatiheys suurimmasta pienimpään				
		Energiatiheys (Wh/kg)	Reagoivat aineet	
Sija:	Akku		+ Elektrodilla	-Elektrodilla
1	ZnCl ₂ -akku	833	Cl ₂	Zn
2	ZEBRA-akku	787	NiCl	Na
3	Litiumioniakku	360	Co	Li
4	NiMH-akku	240	H	Ni
5	Lyijyakku	161	PbO ₂	Pb

Vertailusta voidaan havaita, että vaikka alkuaineet on järjestetty jaksollisessa järjestelmässä atomipainonsa ja uloimman elektronivyönsä elektronien määrän mukaan järjestykseen, ei nähtävissä valitettavasti kuitenkaan ole mitään selviä loogisuuksia energiatihedyyksistä tämän tutkimuksen pohjalta. Suurempi määrä tutkittavia akkuja voisi ehkä antaa parempia tuloksia, mutta todellisuudessa jos tuloksia haetaan vain tältä osin, on helpompi järjestää metallit niiden välisten potentiaalien ja yhteispainon mukaiseen taulukkoon mahdollisiksi elektrodipareiksi kuten esimerkiksi taulukossa 7.

Taulukko 7. Mahdollisia elektrodimateriaaleja [14, s. 9]

Negatiivinen elektrodi ↓	Positiivinen elektrodi →				
	H ₂	Li	Na	Mg	Zn
F ₂	4100 (3,06 V)	6270 (6,07 V)	3588 (5,62 V)	4690 (5,45 V)	1871 (3,81 V)
Cl ₂	1000 (1,36 V)	2520 (3,99 V)	1830 (3,99 V)	1732 (3,06 V)	755 (1,92 V)
Br ₂	354 (1,07 V)	1116 (3,62 V)	941 (3,61 V)	755 (2,59 V)	384 (1,61 V)
O ₂	3667 (1,23 V)	5222 (2,91 V)	1692 (1,96 V)	3910 (2,94 V)	1060 (1,65 V)
S	223 (0,14 V)		1293 (1,88 V)	1728 (1,82 V)	567 (1,03 V)

5.2 Latausaika

Seuraavaksi verrataan tutkittujen akkujen latausaikoja elektrodiparien perusteella jaksollisessa järjestelmässä (liite 5, kuva 2). Alla olevassa taulukossa tutkittavat akut on asetettu latausaikojensa perusteella järjestykseen lyhyimmän latausajan vaativasta eniten aikaa vievään.

Taulukko 8. Tutkitut akut latausaikojen mukaisessa järjestyksessä

Latausaika nopeimmasta hitaimpaan			Reagoivat aineet	
Sija	Akku	Hidaslatauksen aika	⊕-Elektrodilla	⊖-Elektrodilla
1	NiMH-akku	1 - 2 h	H	Ni
2	Litiumioniakku	2,5 h	Co	Li
3	ZEBRA-akku	3 - 6 h	NiCl	Na
4	ZnCl ₂ -akku	6 - 10 h	Cl ₂	Zn
5	Lyijyakku	8 - 24 h	PbO ₂	Pb

Selkeitä loogisuuksia, joiden perusteella voitaisiin päätellä parhaimmat elektrodimateriaalit akun latauksen kannalta, ei jaksollisesta järjestelmästä ollut pääteltävissä. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että akun latausnopeus perustuu akun sisäiseen resistanssin, johon vaikuttavat elektrodiparien lisäksi monet muutkin tekijät. Voidaan ainoastaan todeta, että akkujen latausaika voi ainakin osittain olla riippuvainen elektrodeiden alkuaineiden atomipainosta. Taulukkoon 9 on koottu elektrodiparien materiaalien painot kevyimmästä raskaimpaan.

Taulukko 9. Elektrodiparien suhteelliset atomimassat

Akku	⊕-Elektrodilla (g/mol)	⊖-Elektrodilla (g/mol)
NiMH-akku	H = 1,00	Ni = 58,70
Litiumioniakku	Co = 58,93	Li = 6,94
ZEBRA-akku	Ni = 58,70 Cl = 35,45	Na = 22,99
ZnCl ₂ -akku	Cl ₂ = 35,45 (x2)	Zn = 65,4
Lyijyakku	Pb = 207,2 O ₂ = 16,00 (x2)	Pb = 207,2

5.3 Akun kestoikä

Viimeiseksi verrataan tutkittujen akkujen sykli-ikää elektrodiparien perusteella jaksollisessa järjestelmässä (liite 5, kuva 3). Taulukossa 10 tutkittavat akut on asetettu niiden sykli-iän perusteella järjestykseen pitkäikäisimmästä lyhytikäisimpään.

Taulukko 10. Tutkitut akut sykli-iän mukaisessa järjestyksessä

Sykli-ikä kestävimmästä heikoimpaan				
Sija	Akku	Sykli-ikä	Reagoivat aineet	
			⊕-Elektrodilla	⊖-Elektrodilla
1	ZEBRA-akku	2500	NiCl	Na
2	Litiumioniakku	1000	Co	Li
3	NiMH-akku	900	H	Ni
4	Lyijyakku	800	PbO ₂	Pb
5	ZnCl ₂ -akku	500	Cl ₂	Zn

Selkeitä johdonmukaisuuksia, joiden perusteella voitaisiin akkuun valita parhaimmat elektrodimateriaalit akun sykli-iän kannalta, ei myöskään jaksollisesta järjestelmästä ollut pääteltävissä.

6 Johtopäätökset

Sähköautolla päästävää ajomatkaa tutkittiin jaksollisessa järjestelmässä akkujen energiatheyksien mukaan. Energiatiheyksien pohjalta ei jaksollisesta järjestelmästä kuitenkaan korostunut mikään osa-alue. Selkeitä johdonmukaisuuksia ei siis ollut löydettävissä. Myöskään akkujen sykli-ikien perusteella ei havaittu, että mikään jaksollisen järjestelmän osa olisi noussut erityisesti esiin. Havaittavissa ei siis ollut selkeitä johdonmukaisuuksia tältäkään kannalta. Johtopäätöksenä on, että joko tarkastelu oli luonteeltaan liian suppea vaikuttavien tekijöiden tai akkujen määrän suhteen tai sitten johdonmukaisuuksia ei ole löydettävissä.

Akkujen latausajan mukaan tehdyn vertailun perusteella näyttää siltä, että akkujen elektrodiparien atomimassalla saattaa olla jotakin tekemistä akun lataamisen kanssa. Latausaikaa voidaan tutkia tarkemmin laskentakaavan avulla, joka on esitetty yhtälössä 9 [18].

$$t = n * e * \frac{F}{I}$$

(9)

t = lataukseen vaadittava aika (s)

n = ainemäärä (mol)

e = siirtyvien elektronien määrä

F = vakio = 96500 As/mol

I = virta, jolla akku ladataan

Kaavan avulla voidaan laskea akun lataukseen tarvittava teoreettinen aika. Siitä voidaan myös havaita, ettei elektrodiparien materiaalien painoilla pitäisi olla merkitystä akun latausnopeuden kannalta. Ainevalinnalla teoreettiseen latausnopeuteen voidaan vaikuttaa huomioimalla ainemäärä, joka tarkoittaa tiettyä määrää atomeja yhdessä moolissa. Toisin sanoen mitä vähemmän valituissa aktiivisissa aineissa on atomeja, sitä pienempi on latausaika. Toinen tapa pienentää latausaikaa on valita elektrodipariksi

aineita, joiden reaktioissa siirtyy vähän elektroneja. Tämä kuitenkin laskee samalla akun kapasiteettia.

Akut eivät kuitenkaan lataudu teoreettisten latausaikojensa mukaisesti. Tämä johtuu akun sisäisestä resistanssista. Vastus akussa saa osan sen läpi johdettavasta virrasta muuttumaan lämmöksi. Toisin sanoen kaikki virta, joka akkuun johdetaan sitä ladattaessa, ei varastoidu uudelleen käytettäväksi. Tästä käytetään nimeä latauksen hyötysuhde. Koska elektrodiparien materiaaleilla on vaikutusta akun sisäiseen resistanssiin, ei tämä työ sulje pois sitä mahdollisuutta, että jaksollisesta järjestelmästä voi löytää selkeitä johdonmukaisuuksia parhaiksi elektrodimateriaaleiksi akun latausnopeuden kannalta. Niitä ei kuitenkaan tässä työssä löydetty.

7 Lopuksi

Insinööriyössä tutkittiin akkujen kemiallisia ominaisuuksia sähköautojen vaatimusten kannalta. Sähköautot ovat kovaa vauhtia tulossa markkinoille, mutta jotta ne voisivat kilpailla tasavertaisesti polttomoottoriautojen kanssa, on niiden pystyttävä samoihin suoritusarvoihin. Sähköauton puutteellinen suorituskyky johtuu niiden akuista. Akut eivät ole vielä riittävän hyviä taatakseen saman ajomatkan ja tankkausnopeuden kuin polttomoottoriautolla on. Muita ongelmia asettavat akkujen kestoikä, hinta ja turvallisuus. Ja vaikka sähköauto mielletään erittäin ekologiseksi ratkaisuksi, on akkujen kierrätys myös otettava huomioon.

Työn tarkoituksena oli selvittää, mistä sähköautojen akuilta vaadittavat ominaisuudet johtuvat. Tämän jälkeen keskityttiin tutkimaan, korostuisiko akkujen ominaisuuksien avulla jaksollisesta järjestelmästä mikään tietty osa tai ryhmä, jonka perusteella akkuun saatettaisiin valita parhaat aineet. Sekä akkujen ominaisuudet että niiden syyt selittyivät työssä perusteellisesti kemian avulla.

Viimeisenä työssä etsittiin jaksollisesta järjestelmästä johdonmukaisuuksia akuilta vaadittavien ominaisuuksien osalta. Tutkimus toteutettiin asettamalla akkujen elektrodimateriaalit jaksolliseen järjestelmään parhaiten ominaisuuden toteuttavasta heikompaan. Selkeitä johdonmukaisuuksia ei työssä löydetty. Tutkimus ei kuitenkaan sulje tätä mahdollisuutta pois ja sitä voi hyödyntää pohjana syvällisemmälle tutkimukselle.

Lähteet

- (1) Juhala Matti ym. 2005. Moottorialan sähköoppi. Jyväskylä: Autoalan Koulutuskeskus Oy.
- (2) Kulju, Alvar.1975. Teknillisten korkeakoulujen ja oppilaitosten KEMIA. Porvoo: Alvar Kulju ja Werner Söderström.
- (3) Internetix opinnot. Verkkodokumentti. Metallien jännitesarja.
<http://opinnot.internetix.fi/fi/muikku2materiaalit/lukio/ke/ke4/2_sahkokemia/2.1_metallienjannitesarja?C:D=hNlb.hng5&m:selres=hNlb.hng5 >
- (4) Karpela, Lea & Meriläinen, Pekka. 2005. Maol taulukot. Keuruu: Otava.
- (5) Dell, Ronald M.&Rand, David A.J. 2001. Understanding batteries. Cambridge: RSC.
- (6) Hämeenoja, Eeva. 1993. Akkuopas. Espoo: Erkki Ahlavuo Oy.
- (7) Autoalan Koulutuskeskus Oy. 2010. Autotekniikan ja elektroniikan päivät 9. – 10.2.2010 AEL, Helsinki – opetusmateriaalikirja. Helsinki: AEL.
- (8) Rand, D.A.J.& Woods, R.&Dell, R.M.1998. Batteries for electric vehicles. Great Britain: SRP Ltd.
- (9) Larminie, James;&Lowry, John. 2003. Electric vehicle technology explained. West Sussex: WILEY.
- (10) Linden, David;&Reddy, Thomas B. 2001. Handbook of batteries, third edition. New York: McGraw-Hill.
- (11) Murtomäki, Lasse ym.2010. Sähkökemia. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, kirjasto, Kopijyvä.
- (12) Helsingistä Vaalimaalle suunnitellaan "ekologista moottoritietä". 18.8.2010. HS: Uutiset. <<http://www.hs.fi/kotimaa/artikkeli/Helsingist%C3%A4+Vaalimaa+lle+suunnitellaan+ekologista+moottoritiet%C3%A4+/1135259436930>>. Luettu 4.1.2011.
- (13) Vuorela, Pete. 2010. Sähköautojen konvertointi ja jarruenergian talteenottaminen. Insinööriyö. Tampereen Ammattikorkeakoulu.
- (14) Bauer, Horst. 2003. Autotekniikan taskukirja, 6. painos. Jyväskylä: Autoalan koulutuskeskus.

- (15) The World of Batteries. 2010. Verkkodokumentti. GRS. <http://www.grs-batterien.de/fileadmin/user_upload/Download/Wissenswertes/Infomaterial_2010/GRS_WDB_eng.pdf>. Luettu 2.1.2011.
- (16) End Sites Recycling Processes. Verkkodokumentti. Battery Solutions. <http://www.batteryrecycling.com/Battery+Recycling+Process>. Luettu 29.12.2010.
- (17) Mäkkeli, Martti. 1994. Sähköautojen akut. Teknikkotyö. Helsingin teknillinen oppilaitos.
- (18) Internetix. Marko Pudas. 1997. Verkkodokumentti. Sähkökemiala. <<http://materiaalit.internetix.fi/fi/opintojaksot/5luonnontieteet/kemia/kemia3/sahkokemiaa>>. Luettu 7.1.2010.
- (19) Mikko Toivonen. 23.6.2010. Energie akku oli sähkö-autokehittelijän valinta. <<http://www.akkutalo.fi/index.php?page=akkutalo-utiset>>. Luettu 22.12.2010.
- (20) Metallien hinnat. Verkkodokumentti. <http://www.srk.se.com/Finnish/Uutiset_&_Lehdist%C3%B6tiedotteet/Metallien_hinnat>. Luettu 31.12.2010.

Liitteet

Normaalipotentialitaulukko

Normaalipotentialitaulukko		
Reaktio		E/V (25 °C)
$\text{Li}^+ + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Li}$	-3,04
$\text{K}^+ + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{K}$	-2,93
$\text{Ba}^{2+} + 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Ba}$	-2,91
$\text{Ca}^{2+} + 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Ca}$	-2,87
$\text{Na}^+ + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Na}$	-2,71
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Mg}$	-2,37
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Al}$	-1,66
$2 \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{OH}^- + \text{H}_2$	-0,83
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Zn}$	-0,76
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Fe}$	-0,45
$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Co}$	-0,28
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Ni}$	-0,26
$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Sn}$	-0,14
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Pb}$	-0,13
$2 \text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{H}_2$	0,00
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Cu}$	+0,34
$\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	$\rightarrow 4 \text{OH}^-$	+0,40
$\text{I}_2 + 2\text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{I}^-$	+0,54
$\text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	+0,70
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0,77
$\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{Hg}$	+0,80
$\text{Ag}^+ + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Ag}$	+0,80
$\text{NO}_3^- + 2 \text{H}^+ + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	+0,80
$\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Hg}$	+0,85
$\text{NO}_3^- + 4 \text{H}^+ + 3\text{e}^-$	$\rightarrow \text{NO} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+0,96
$\text{Br}_2 + 2\text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{Br}^-$	+1,07
$\text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Pt}$	+1,18
$\text{MnO}_2 + 4 \text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,22
$\text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,23
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14 \text{H}^+ + 6\text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{Cr}^{3+} + 7 \text{H}_2\text{O}$	+1,33
$\text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{Cl}^-$	+1,36
$\text{MnO}_4^- + 8 \text{H}^+ + 5\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Mn}^{2+} + 4 \text{H}_2\text{O}$	+1,51
$\text{Au}^+ + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Au}$	+1,69
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{SO}_4^{2-}$	+2,01
$\text{F}_2 + 2\text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{F}^-$	+2,87

[4, s. 146]

Omavalmisteinen sähköauto

AKKUTALO UUTISET

ENERGIE AKKU OLI SÄHKÖ-AUTOKEHITTELIJÄN VALINTA

23.06.2010

Energie akut valittiin vaativaan sähkö-autoprojektiin, jonka tuloksena lanseerattiin katsastettu täyssähkö-auto. Akuksi valittiin **Energie 105 Ah ajovoima-akku**. Akku on osoittautunut käyttökokemusten perusteella oikeaksi valinnaksi, kertoo ajoneuvon kehittäjä ja omistaja.

Ajoneuvon toimintasäde on yli 50 kilometriä, ja se kulkee puhtaasti sähkömoottorin voimalla.

Vihreää juhannusta toivotellen,

Mikko Toivonen



[Print](#)

[Return](#)

Finn Sukon Oy | 21350 ILMARINEN | Puh: 020 7890 790
finnsukon@akkutalo.fi | Pakurilantie 1 | Fax: 020 7890 799

Akkutalo

Metallien hinnat



The prices of metals in the currencies of countries that mine the commodities can vary considerably from prices commonly quoted in the press, most of which are denominated in US dollars. Ultimately, it's the price of the metal in the domestic currency that's of importance to the metal miner. As such, the dollar exchange rate is a crucial aspect in determining the profitability of a mining company that sells a product internationally.

[English](#) | [Swedish](#) | [Finnish](#) | © 2009 SRK Consulting |

Me olemme riippumattoman kansainvälisen SRK Consulting konsernin pohjoinen uloke.

Me tarjoamme kattavaa erikoiskonsultointia kaivosteollisuudelle ympäri maailmaa.

SRK Consulting (Sweden) AB. Org. nr 556768-5689. Toimipaikka Skellefteå

Kuva 1 [20.]



The prices of metals in the currencies of countries that mine the commodities can vary considerably from prices commonly quoted in the press, most of which are denominated in US dollars. Ultimately, it's the price of the metal in the domestic currency that's of importance to the metal miner. As such, the dollar exchange rate is a crucial aspect in determining the profitability of a mining company that sells a product internationally.

[English](#) | [Swedish](#) | [Finnish](#) | © 2009 SRK Consulting |

Me olemme riippumattoman kansainvälisen SRK Consulting konsernin pohjoinen uloke.

Me tarjoamme kattavaa erikoiskonsultointia kaivusteollisuudelle ympäri maailmaa.

SRK Consulting (Sweden) AB. Org. nr 556768-5689. Toimipaikka Skellefteå

Kuva 2 [20.]



The prices of metals in the currencies of countries that mine the commodities can vary considerably from prices commonly quoted in the press, most of which are denominated in US dollars. Ultimately, it's the price of the metal in the domestic currency that's of importance to the metal miner. As such, the dollar exchange rate is a crucial aspect in determining the profitability of a mining company that sells a product internationally.

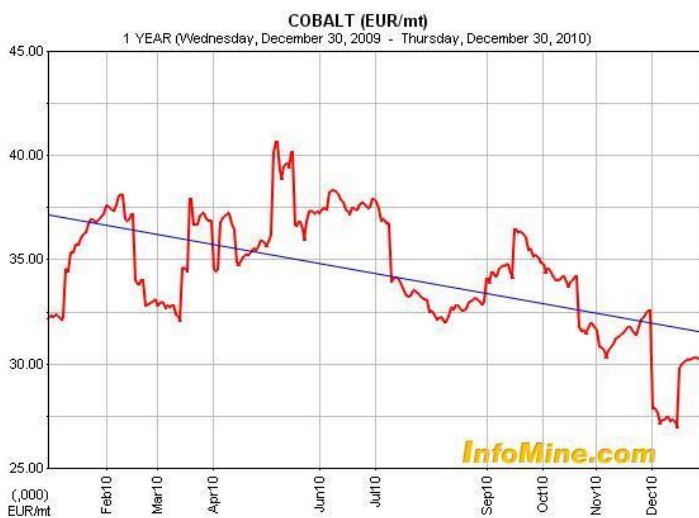
[English](#) | [Swedish](#) | [Finnish](#) | © 2009 SRK Consulting |

Me olemme riippumattoman kansainvälisen SRK Consulting konsernin pohjoinen uloke.

Me tarjoamme kattavaa erikoiskonsultointia kaivosteollisuudelle ympäri maailmaa.

SRK Consulting (Sweden) AB. Org. nr 556768-5689. Toimipaikka Skellefteå

Kuva 3 [20.]



The prices of metals in the currencies of countries that mine the commodities can vary considerably from prices commonly quoted in the press, most of which are denominated in US dollars. Ultimately, it's the price of the metal in the domestic currency that's of importance to the metal miner. As such, the dollar exchange rate is a crucial aspect in determining the profitability of a mining company that sells a product internationally.

[English](#) | [Swedish](#) | [Finnish](#) | © 2009 SRK Consulting |

Me olemme riippumattoman kansainvälisen SRK Consulting konsernin pohjoinen uloke.

Me tarjoamme kattavaa erikoiskonsultointia kaivosteollisuudelle ympäri maailmaa.

SRK Consulting (Sweden) AB. Org. nr 556768-5689. Toimipaikka Skellefteå

Kuva 4 [20.]

Alkuaineiden jaksollinen järjestelmä

Alkuaineiden jaksollinen järjestelmä

Metallit *Epametallit*

R Y H M Ä T

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
J	1	H																	He
A	2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
K	3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
S	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
O	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
T	6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
	7	Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Una	Une									
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Kaasu
 Neste
 Kiteä aine
 Muista alkuaineista ydinreaktion avulla valmistettu aine

Tutkittujen akkujen ominaisuudet jaksollisessa järjestelmässä

Energiatiheydet

Metallit																		Epämetallit	
R Y H M Ä T																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
J	1	H																He	
A	2	Li	Be										B	C	N	O	F	Ne	
K	3	Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar	
S	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
O	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
T	6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
	7	Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Una	Une									
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Energiatiheys suurimmasta pienimpään			
Sija:	Akku	Energiatiheys (Wh/kg)	Reagoivat aineet
1	ZnCl ₂ -akku	833	Cl ₂ Zn
2	ZEBRA-akku	787	NaCl Na
3	Litiumioniakku	360	Co Li
4	NiMH-akku	240	H Ni
5	Lyijyakku	161	PbO ₂ Pb

Metallit																		Epämetallit	
R Y H M Ä T																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
J	1	H																He	
A	2	Li	Be										B	C	N	O	F	Ne	
K	3	Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar	
S	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
O	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
T	6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
	7	Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Una	Une									
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Metallit																		Epämetallit	
R Y H M Ä T																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
J	1	H																He	
A	2	Li	Be										B	C	N	O	F	Ne	
K	3	Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar	
S	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
O	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
T	6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
	7	Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Una	Une									
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Metallit																		Epämetallit	
R Y H M Ä T																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
J	1	H																He	
A	2	Li	Be										B	C	N	O	F	Ne	
K	3	Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar	
S	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
O	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
T	6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
	7	Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Una	Une									
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Metallit																		Epämetallit	
R Y H M Ä T																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
J	1	H																He	
A	2	Li	Be										B	C	N	O	F	Ne	
K	3	Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar	
S	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
O	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
T	6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
	7	Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Una	Une									
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Latausajat

Metallit																		Epämetallit					
R Y H M Ä T																		13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
J	1	H											B	C	N	O	F	He					
A	2	Li	Be															Ne					
K	3	Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar						
S	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
O	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
T	6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
	7	Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Una	Une													
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Latausaika nopeimmasta hitaimpaan			
Sija:	Akku	Hidaslatauksen aika	Reagoivat aineet
1	NiMH-akku	1-2 h	H Ni + Elektrodiilla -Elektrodilla
2	Litiumioniakku	2,5 h	Co Li
3	ZEBRA-akku	3-6 h	NiCl Na
4	ZnCl ₂ -akku	6-10 h	Cl ₂ Zn
5	Lyijyakku	8-24 h	PbO ₂ Pb

Metallit																		Epämetallit					
R Y H M Ä T																		13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
J	1	H											B	C	N	O	F	He					
A	2	Li	Be															Ne					
K	3	Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar						
S	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
O	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
T	6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
	7	Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Una	Une													
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Metallit																		Epämetallit					
R Y H M Ä T																		13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
J	1	H											B	C	N	O	F	He					
A	2	Li	Be															Ne					
K	3	Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar						
S	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
O	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
T	6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
	7	Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Una	Une													
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Metallit																		Epämetallit					
R Y H M Ä T																		13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
J	1	H											B	C	N	O	F	He					
A	2	Li	Be															Ne					
K	3	Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar						
S	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
O	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
T	6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
	7	Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Una	Une													
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Metallit																		Epämetallit					
R Y H M Ä T																		13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
J	1	H											B	C	N	O	F	He					
A	2	Li	Be															Ne					
K	3	Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar						
S	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
O	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
T	6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
	7	Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Una	Une													
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Akkuien kestoajat

Metallit																		Epämetallit					
R Y H M Ä T																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18					
J	1	H																He					
A	2	Li	Be										B	C	N	O	F	Ne					
K	3	Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar					
S	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
O	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
T	6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
	7	Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Una	Une													
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Sykli-ikä kestävimmästä heikoimpaan				
Sija:	Akku	Sykli-ikä	Reagoivat aineet	
			+Elektrodilla	-Elektrodilla
1	ZEBRA-akku	2500	NiCl	Na
2	Litiumioniakku	1000	Co	Li
3	NiMH-akku	900	H	Ni
4	Lyijyakku	800	PbO ₂	Pb
5	ZnCl ₂ -akku	500	Cl ₂	Zn

Metallit																		Epämetallit					
R Y H M Ä T																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18					
J	1	H																He					
A	2	Li	Be										B	C	N	O	F	Ne					
K	3	Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar					
S	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
O	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
T	6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
	7	Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Una	Une													
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Metallit																		Epämetallit					
R Y H M Ä T																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18					
J	1	H																He					
A	2	Li	Be										B	C	N	O	F	Ne					
K	3	Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar					
S	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
O	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
T	6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
	7	Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Una	Une													
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Metallit																		Epämetallit					
R Y H M Ä T																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18					
J	1	H																He					
A	2	Li	Be										B	C	N	O	F	Ne					
K	3	Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar					
S	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
O	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
T	6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
	7	Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Una	Une													
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Metallit																		Epämetallit					
R Y H M Ä T																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18					
J	1	H																He					
A	2	Li	Be										B	C	N	O	F	Ne					
K	3	Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar					
S	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
O	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
T	6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
	7	Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Una	Une													
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				