

Eero Kokko

Sähköautojen akkutekniikan kehittyminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

13.10.2016

Tekijä(t)	Eero Kokko
Otsikko	Sähköautojen akkutekniikan kehittyminen
Sivumäärä	22 sivua
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Jälkimarkkinointi
Ohjaaja(t)	Lehtori Vesa Linja-aho
<p>Insinööriyöni tavoitteena on selvittää sähköautojen akkutekniikan kehittymistä eri näkökulmista. Työssä kartoitetaan, miten sähköautojen akustojen hinnat ja tekniikka ovat kehittyneet, mikä on nykypäivän tilanne ja mitkä ovat tulevaisuuden näkymät. Lisäksi selvitetään sähköautojen akustojen elinkaarta ja takuita, joita valmistajat niille antavat.</p> <p>Insinööriyö toteutettiin kirjallisuustutkimuksena keräämällä tietoa tutkimuksista, artikkeleista ja raporteista lähteinä alan kirjallisuus ja luotettavat internetsivustot. Myös sähköautojen valmistajien kotisivuilta saatiin tärkeää tietoa.</p> <p>Työn tulokset osoittavat, että vuosien 2025–2030 aikana tullaan saavuttamaan akustojen kustannusraja, jonka jälkeen sähköautojen yleistyminen alkaa toden teolla. Työssäni kävi myös ilmi, että akusto on edelleen sähköauton kalleimpia komponentteja, ellei kallein.</p> <p>Nykyisin litiumioniakut hallitsevat markkinoita, mutta lähitulevaisuudessa niiden korvaajaksi nousevat todennäköisesti solid-state-litiumakut.</p> <p>Työssä tutkitun Tesla Model S:n akusto tuli elinkaarensa päähän noin 200 000 kilometrin ajon jälkeen. Selvityksen mukaan yleisin sähköauton akuston takuu on kahdeksan vuotta tai 160 000 kilometriä.</p>	
Avainsanat	Sähköauto, akkutekniikka, akustojen hintakehitys, akustojen takuut

Author(s)	Eero Kokko
Title	Evolution of the Electric Car Battery Technology
Number of Pages	22 pages
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Specialisation option	After Sales Engineering
Instructor(s)	Vesa Linja-aho, Senior Lecturer
<p>The objective of this thesis was to study the development of electric car battery technology from different angles. The work surveys how the prices and technology of the electric car batteries have evolved, what the situation is today, and what the prospects for the future are. Furthermore, the work aims at finding out the life cycle and guarantees for the battery pack of electric cars, which the manufacturers provide with them.</p> <p>The thesis was carried as a literature review by collecting information from studies, articles and reports. The sources used in this study are from industry literature and reliable internet sites. In addition, important information was obtained from electric car manufacturers' web sites.</p> <p>The results show that over the years 2025–2030 a battery pack cost limit will be achieved which will lead to the real breakthrough of the electric car. This work also shows that the battery pack is still one of the most expensive electric car components, if not the most expensive.</p> <p>Today lithium-ion batteries dominate the market, but in the near future they will be most likely replaced with the solid-state-lithium batteries.</p> <p>The battery pack of Tesla Model S used in this work came to the end of its life cycle after 200 000 kilometers of driving. According to the work the most common electric car battery warranty is eight years or 160 000 kilometers.</p>	
Keywords	Electric car, battery technology, battery cost development, electric car battery warranty

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähköautojen akkujen historia	1
3	Sähköautojen akkutekniikka nykyään	3
3.1	Hallitseva litiumioniakkutekniikka	3
3.2	Litiumakustojen hintakehitys	4
3.3	Sähköautojen litiumakustojen hinnat nykyään	6
3.3.1	Chevrolet Bolt	6
3.3.2	Tesla Model S 70D	6
3.4	Akustojen elinkaari	6
3.5	Uudet akkutekniikat	8
3.5.1	Solid-state-litiumakku	8
3.5.2	Litium-ilma-akku	9
3.5.3	Litium-rikkiakku	10
3.6	Akustojen takuut	11
4	Yhteenveto	12
	Lähteet	14

Lyhenteet

kWh	Kilowattitunti. Energian yksikkö, joka vastaa tuhannen watin tehoa tunnin ajan.
Wh/kg	Energiatiheys. Mittaa tiettyyn systeemiin tai tilavuuteen varastoituneen energian suuruutta tilavuusyksikköä tai massayksikköä kohden.
\$/kWh	Suhde, joka kertoo, kuinka paljon yhden kilowattitunnin valmistaminen akustoon maksaa dollareissa.
Elektrodi	Sähköparin osa, jossa tapahtuu sähkökemiallinen reaktio.
Anodi	Elektrodi, jolla hapettumisreaktio tapahtuu.
Katodi	Elektrodi, jolla tapahtuu pelkistymisreaktio.
Ioni	Varauksen kuljettava hiukkanen elektrolyyttiliuoksessa.
Elektrolyytti	Väliaine, joka kuljettaa ioneja elektrodien välillä.
Separattori	Akussa oleva komponentti, joka pitää elektrodit erillään estääkseen oikosulun akussa, sallien silti ionien liikkumisen elektrodien välillä.

1 Johdanto

Akusto on yksi modernin sähköauton kalleimmista osista. Akustojen kalleus on edelleen suurin este sähköautojen suurelle yleistymiselle, mutta viimeisen kymmenen vuoden aikana tapahtunut akustojen tasainen hintojen laskeminen ja teknologinen kehittyminen ovat johtaneet siihen, että sähköautot alkavat olla entistä kilpailukykyisempiä hinnaltaan sekä toimintasäteeltään verrattuna markkinoita hallitseviin polttomoottoriautoihin.

Insinööriyön tavoitteena on luoda katsaus sähköautojen litiumakustojen hintojen historialliseen kehitykseen ja tulevaisuuden näkymiin sekä perehtyä hallitsevaan litiumakku-teknologiaan ja tulevaisuuden akkuteknologioihin.

Katsaus pyrkii selvittämään myös, kuinka suuren osuuden nykyisten sähköautojen hinnasta muodostaa akusto.

Insinööriyössä arvioidaan nykyisten sähköautojen akustojen elinkaarta. Työhön on koottu myös joitakin sähköautojen valmistajien litiumakustoille myöntämiä takuita.

Opinnäytetyö on toteutettu tutkimuspohjaisena kirjallisuuskatsauksena keräämällä yhteen tietoa sähkökäyttöisistä ajoneuvoista ja niiden akustoista eri internet- ja kirjallisuuslähteistä.

2 Sähköautojen akkujen historia

Aina siitä lähtien, kun Robert Davidson 1837 esitteli sähköllä toimivan vetojärjestelmän, on insinöörien, tiedemiehien ja yrittäjien tavoitteena ollut kehittää tehokas sähköllä toimiva maantieajoneuvo. Aluksi kiinnostus akkukäyttöisiin sähköautoihin kumpusi tarpeesta saada ajoneuvo, jolla pystyttäisiin kulkemaan nopeammin ja pitemmälle kuin hevosen vetämillä kärryillä. Nykyisin tarve sähköautoille johtuu siitä, että öljyvarat ovat vähenemässä, ja maapallo on alkanut lämmetä ilmastonmuutoksen vuoksi, ja yksi iso syyllinen tähän ovat saasteita tuottavat polttomoottoriajoneuvot. (Rand ym. 1998: 1.)

Davidsonin aikaiset akut olivat kehoja varastoimaan ja luovuttamaan energiaa. Jotta sähköisestä liikenteestä saataisiin käytännöllisesti järkevää, tarvittaisiin uusi akkuteknologia, joka antaisi suuremman sähkötehon ja jolla pystyttäisiin lataamaan tehokkaasti. Ensimmäisenä keksittiin lyijyakku, jonka Gaston Planté esitteli Ranskan tiedeakatemialle vuonna 1860. Kesti kaksikymmentä vuotta, ennen kuin lyijyakku saatiin kehitettyä sellaiselle tasolle, että sitä pystyttiin valmistamaan kaupallisesti ja suurissa määrin. (Rand ym. 1998: 1-2; Leitman & Brant 1994: 31–32.)

Seuraavaksi markkinoille tulivat nikkeli-kadmium- ja nikkeli-rauta-akut. Näiden järjestelmien massatuotannon kautta sähköautoista tuli yleinen näky teollistuneiden maiden maanteillä. Vuoteen 1912 mennessä useita satojatuhansia sähköautoja ja kuorma-autoja oli käytössä ympäri maailmaa kaupunkiautoina, takseina, jakeluautoina ja busseina. (Rand ym. 1998: 2; Leitman & Brant 1994: 32.)

Siitä huolimatta sähköautojen kultainen aikakausi loppui lyhyeen. Syinä tähän olivat maailmanlaajuisen öljyntuotannon kymmenkertaistuminen vuosien 1890–1920 aikana, Charles F. Ketteringin vuonna 1911 keksimä polttomoottoriauton sähköstartti (ironisesti käyttämällä lyijyakkuja) ja ensimmäisen polttomoottoriauton sarjatuotannon alkaminen vuonna 1913 (Ford Model T). Näiden asioiden myötä polttomoottoriauto pystyi paremmin tyydyttämään ihmisten tarpeita, joita olivat pitempi toimintasäde, nopeus, liikkuvuus ja kaikki nämä halpaan hintaan. Siitäkin huolimatta, että vuosina 1910–1925 sähköakkujen energian varastoimiskapasiteetti oli kasvanut 35 % ja käyttöikä 300 % samalla, kun huoltokustannukset laskivat 63 %, sähköautojen suorituskyky ei siltikään yltänyt polttomoottoriautojen tasolle. (Rand ym. 1998: 1–2; Leitman & Brant 1994: 31–32.)

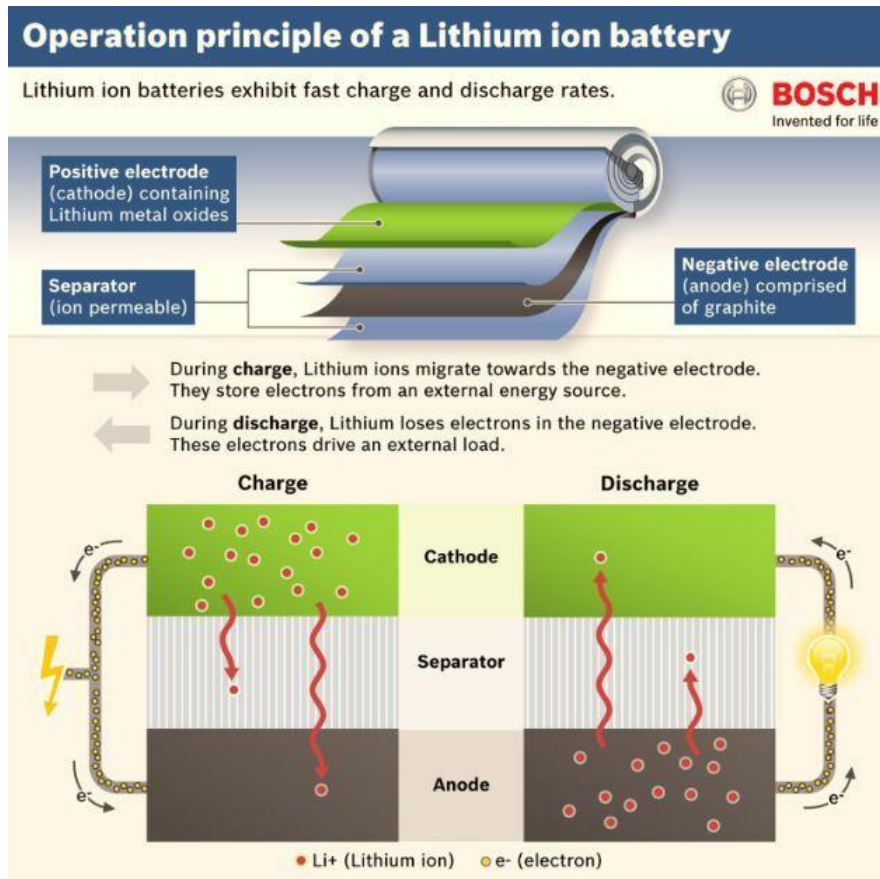
Bensiinin huomattavasti suurempi energiatiheys antoi sille suuren etulyöntiaseman sähköön verrattuna. Esimerkiksi yhden litran lyijyakku painaa 2,4 kg ja sisältää 0,07 kWh energiaa ja kuljettaa henkilöautoa muutaman sata metriä. Yksi litra bensiiniä puolestaan painaa 0,85 kg ja sisältää 11 kWh energiaa ja kuljettaa henkilöautoa noin 10 km. Näin polttomoottoriautoissa suuri määrä energiaa saatiin pieneen tilaan vähällä painolla. Lisäksi polttomoottoriauton pystyi tankkaamaan muutamissa minuuteissa verrattuna sähköautoon, jonka lataus kesti tunteja. Nämä kaksi tekijää, lyhyt toimintasäde ja pitkä akkujen latausaika, jarruttivat pahasti ensimmäisten sähköautojen kilpailukykyä. 1930-luvun loppuun mennessä sähköautoteollisuus loppui kokonaan, ja akkukäyttöistä sähkövetoa käytettiin enää teollisuusajoneuvoissa. (Rand ym. 1998: 1–2; Leitman & Brant 1994: 31–32.)

3 Sähköautojen akkutekniikka nykyään

3.1 Hallitseva litiumioniakkutekniikka

Litiumakun kehitystyön aloitti G. N. Lewis vuonna 1912, mutta vasta 1970-luvun alussa ensimmäinen ei-ladattava litiumparisto tuli kaupallisesti saataville. 1980-luvulla ryhdyttiin kehittämään ladattavaa litiumakkua, mutta yritykset eivät onnistuneet, koska metallinen litiumanodi ei pysynyt vakaana. Litiummetallin epävakaus ongelmat johtivat siihen, että alettiin etsiä metallitonta ratkaisua, jossa käytettäisiin litiummetallin sijasta litiumioneja. Vuonna 1991 Sony julkaisi ensimmäisen kaupallisesti saatavilla olevan litiumioniakun. Litiumioniakut hallitsevat markkinoita vielä tänäkin päivänä ja kehittyvät edelleen. (Buchmann 2015a.)

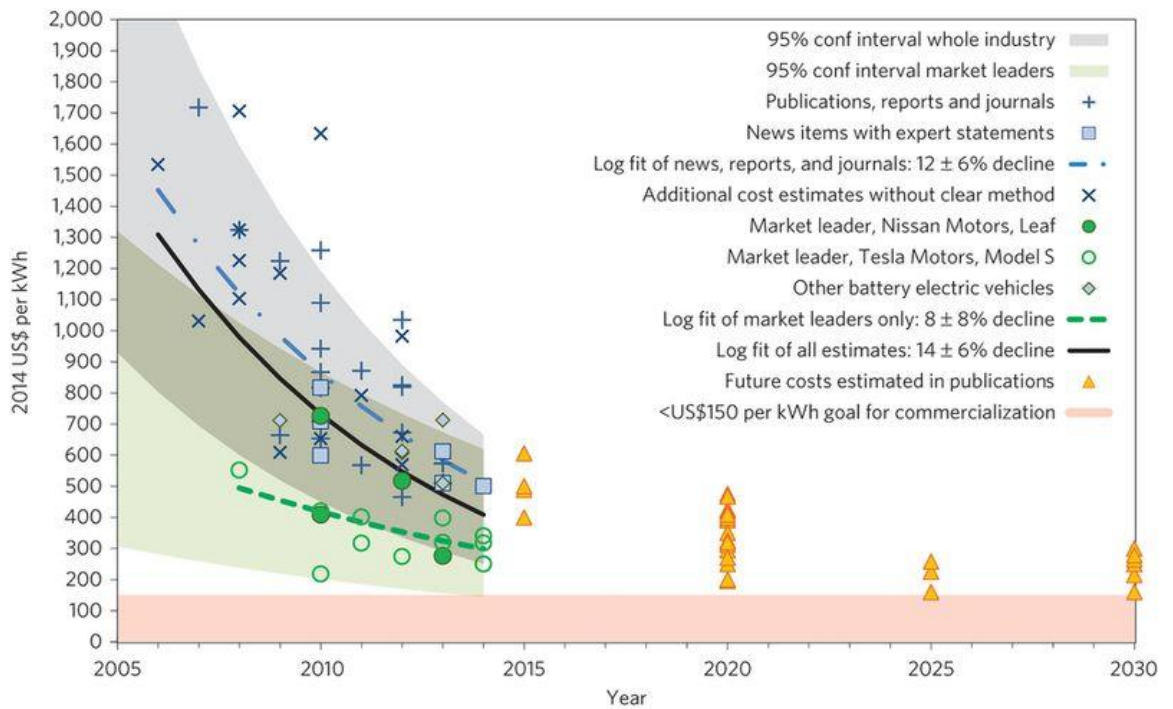
Litiumioniakuissa anodi (negatiivinen) tehdään yleensä grafiitista ja katodi (positiivinen) komposiitti materiaalista, joka sisältää litiumia. Separattorina toimii huokoinen materiaali, jonka läpi litiumionit menevät lataus-purkusyklien aikana. Nestemäinen elektrolyytti kuljettaa litiumionit anodista katodiin ja takaisin, kuten kuvassa 1 on esitetty. (Lombardo 2015.) Litiumioniakun energiatiheys on noin 100–250 Wh/kg ja elinikä on noin 1200–1500 täyttä lataus-purkusykliä, mikä tekee siitä hyvän akun sähköautoihin (Buchmann 2015b; Arcus 2016).



Kuva 1. Litiumioniakun toimintaperiaate (Lombardo 2015).

3.2 Litiumakustojen hintakehitys

Jotta pystytään kunnolla arvioimaan tulevaisuudennäkymiä kaupallisesti kilpailukykyiselle sähköautolle, tarvitaan tarkkaa ja ajankohtaista sekä ennustettua tietoa akustojen hinta kehityksestä. Alan kirjallisuudesta selviää, että kustannukset laskevat, mutta arviointiin sisältyy suuria epävarmuuksia menneissä, nykyisissä ja tulevaisuuden kustannuksissa hallitsevan Li-ion-akkutekniikan osalta. Tutkijat Björn Nykvist ja Måns Nilsson (2015a) Tukholman ympäristöinstituutista analysoivat 80 eri raporttia vuosilta 2007–2014, jotta he pystyivät systemaattisesti jäljittämään Li-ion-akkupakettien hintoja sähköautojen valmistajille. Tutkimuksesta käy ilmi, että akustojen hinnat ovat laskeneet yli 1000 \$:sta (913,70 €) per kWh noin 410 \$:iin (374,62 €) per kWh eli noin 14 % vuodessa. Markkinajohdossa olevien sähköautonvalmistajien käyttämien akustojen hinnat putosivat vielä enemmän eli noin 300 \$ (274,11 €) per kWh ja ovat laskeneet siitä edelleen 8 % vuosittain. (Nykvist & Nilsson 2015a, b)



Kuva 2. Sähköautojen litiumioniakustojen kustannuksia (Nykvist & Nilsson 2015a).

150:tä dollaria (137,06 €) per kWh pidetään yleisesti rajana, jonka jälkeen sähköautojen kaupallistuminen alkaa toden teolla. Kaaviosta (kuva 2) näkyy, että tämä raja tullaan luultavasti saavuttamaan vuosina 2025–2030. Nykvistin ja Nilssonin tutkimus arvioi koko sähköautoalan litiumioniakustojen hinnaksi vuonna 2015 noin 350 \$ (319,80 €). (Nykvist & Nilsson 2015a.)

Bloombergin julkaisemasta raportista (Randall 2016) selviää, että vuonna 2015 koko sähköautoalan litiumioniakustojen todellinen hinta oli vähän alle 350 € (319,80 €) per kWh. Tutkimuksen ja raportin tulokset tukevat siis toisiaan. Bloomberg arvio, että vuonna 2016 koko sähköautoalan litiumioniakustojen hinnat ovat noin 300 \$ (274,11 €) per kWh, eli hinnat laskisivat noin 14 %. Tämä arvio tukee myös Nykvistin ja Nilssonin tutkimuksessa (2015a) todettua 14 %:n hinnan laskua vuosittain.

3.3 Sähköautojen litiumakustojen hinnat nykyään

Seuraavassa tarkastellaan kahden eri hintaluokan sähköautoa. Chevrolet Bolt edustaa edullisimpia sähköautoja kun taas Tesla Model S 70D kalliimpia sähköautoja. Näiden kahden sähköauton vertailu tehtiin, koska haluttiin selvittää, kuinka suuren osan auton myyntihinnasta auton akusto muodostaa.

3.3.1 Chevrolet Bolt

Akusto on modernin sähköauton kallein osa. Akustojen kalleus on edelleen suurin este sähköautojen suurelle kaupallistumiselle. General Motorsin tuotepäällikkö Mark Reusin mukaan, yrityksen valmistamassa vuoden 2017 Chevrolet Bolt:ssa käytetään akkukenoja, jotka maksavat yhtiölle 145 \$ (132,49 €) per kWh. Entinen General Motorsin sähkötekniikkaekspertti Jon Bereisa arvioi akuston maksavan yhtiölle 215 \$ (196,45 €) per kWh eli noin 48 % lisää akkukenojen kustannuksiin. (Voelcker 2016.) Yhden Chevrolet Boltin akusto maksaa arvioiden mukaan seuraavaa: akuston energiakapasiteetti 60 kWh x akuston hinta 215 \$ (196,45 €) per kWh = 12 900 \$ (~ 11 786,73 €). Akuston osuus koko auton myyntihinnasta 30 000 \$ [27 411 €] ($12\,900\ \$ / 30\,000\ \$ \times 100 = 43\ %$). (Introducing the All-Electric 2017; Chevrolet BoltEV 2016a.)

3.3.2 Tesla Model S 70D

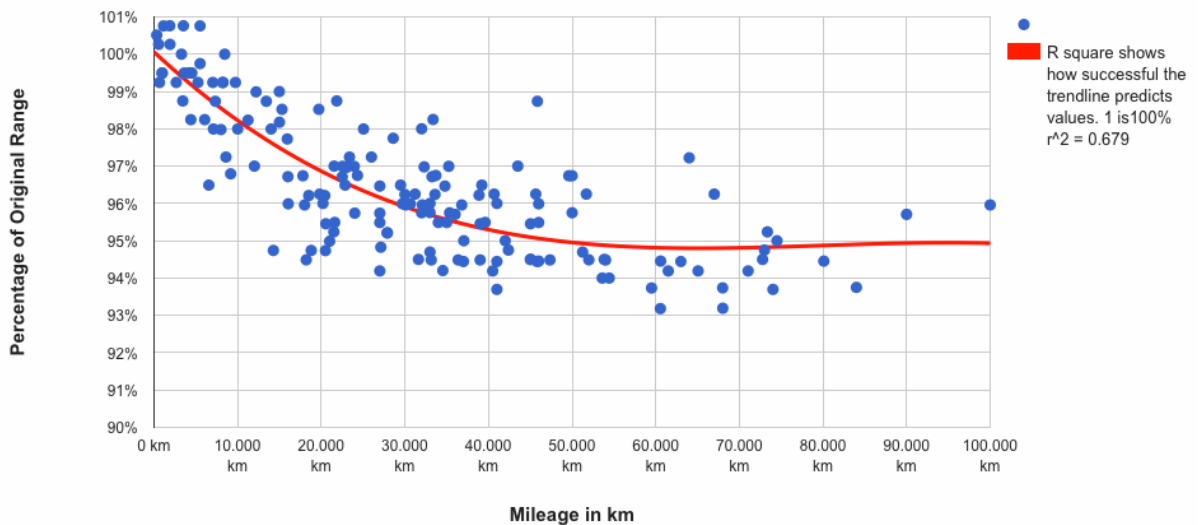
Tesla Model S:n akuston kustannukset yhtiölle ovat alle 190 \$ (173,60 €) per kWh (Voelcker 2016). Yhden Tesla Model S 70D:n akusto maksaa arviolta seuraavaa: akuston energia kapasiteetti 70 kWh x akuston hinta 190 \$ (173,60 €) per kWh = 13 300 \$ (12 152,21 €). Akuston osuus koko auton myyntihinnasta on ($12\,152,21\ € / 85\,000\ € \times 100 = 14,30\ %$). (Voelcker 2016; Linja-aho 2016a.)

3.4 Akustojen elinkaari

Litiumioniakkujen elinikää mitataan lataus-purkusykleissä. Toisin sanoen, kun akku latautuu ja purkautuu kerran, sitä kutsutaan yhdeksi sykliksi. Kautta alan standardina

käytetään sykli-ikäinä 80 %:a akun alkuperäisestä kapasiteetista, kun akun kyky varastoida energiaa laskee alle 80 %:iin alkuperäisestä energian varastointikyvystä, akun sykli-ikä tulee päätökseen. (Arcus 2016.)

Tesla Model S:lle tehtiin Euroopassa 80 autoa sisältävä tutkimus, jossa tutkittiin akuston energian varastoimiskyvyn alenemista verrattuna autolla ajettuihin kilometreihin. Tutkimukseen osallistuneet autojen omistajat kuuluvat eurooppalaiseen Tesla Motor Clubiin. Tutkimusdatasta selvisi, että Tesla Model S:n akuston energian varastointikapasiteetti aleni keskimäärin noin 5 % ~ 50 000 km:n matkalla (kuva 6). 95 % tutkimuksen autoista oli varustettu 85 kWh:n akustolla, ja kaikki tutkimuksen osallistuneet autot oli valmistettu vuosina 2013–2015. (Jivan 2015.) Akuston kapasiteetti ei kuitenkaan heikkene lineaarisesti. Litiumakuille on tyypillistä, että kapasiteetti heikkenee aluksi nopeammin, minkä jälkeen heikkenemisvauhti hidastuu. (Lambert 2016; Lithium ion 2016.) Auton omistajalla, ajotyylillä sekä auton käyttötarkoituksella on suuri vaikutus siihen milloin akusto on siinä pisteessä, että se pitää vaihtaa. Vaikka akuston kapasiteetti olisi tippunut 70 tai 60 %:iin, se riittää vielä erinomaisesti kuskille joka ajaa suurimman osan ajoistaan kaupungissa. (Linja-aho 2016b.)



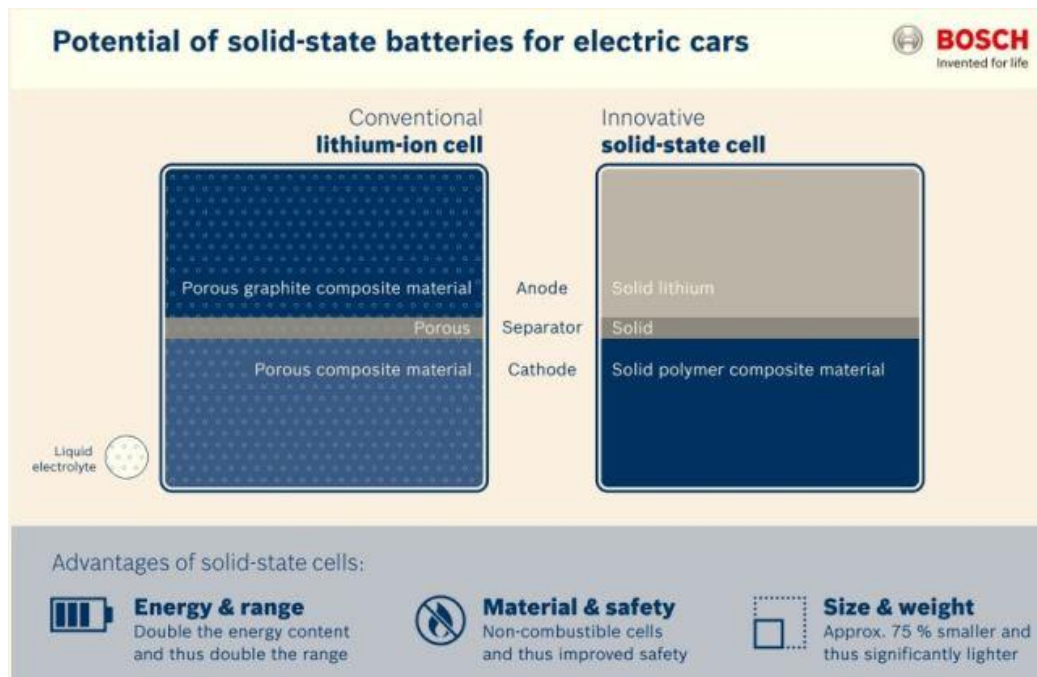
Kuva 3. Tesla Model S autojen akukapasiteetin aleneminen (Jivan 2015).

3.5 Uudet akkutekniikat

3.5.1 Solid-state-litiumakku

Solid-state-litiumakuissa anodina toimii kiinteä litium ja katodina kiinteä polymeerikomposiitti; myös separaattori on kiinteä. Solid-state-akuissa luvataan olevan kaksi kertaa suurempi energiatiheys kuin litium-ioniakussa (kuva 3), mikä kaksinkertaistaa auton toimintasäteen ilman auton painon nousua. Ongelma Solid-state-akuissa on vielä se, että kiinteä litium laajenee ja supistuu lataus- ja purkusyklien aikana ja tämä saa aikaan halkeamia litiumin pinnalla. Halkeamiin alkaa kerääntyä dendriittejä, ja loppujen lopuksi ne saavat aikaan oikosulun akussa. Lisäksi haasteina on saavuttaa riittävä sähkönjohtavuuskyky kylmissä lämpötiloissa ja lataus-purkusyklien määrän kasvattaminen. (Lombardo 2015; Buchmann 2016.)

Solid-state-akkujen prototyypit ovat saavuttaneet vain 100 lataus-purkusyklin eliniän, joten matkaa on vielä litium-ioniakun noin 1200–1500 lataus-purkusyklin elinikään, joka vastaa 366 000:ta mailia (589 020 km) auton matkamittarissa (Arcus 2016). Boschin mukaan Solid-state-akut voisivat olla markkinoilla vuonna 2020 ja autojen akkuina vuonna 2025 (Buchmann 2016).

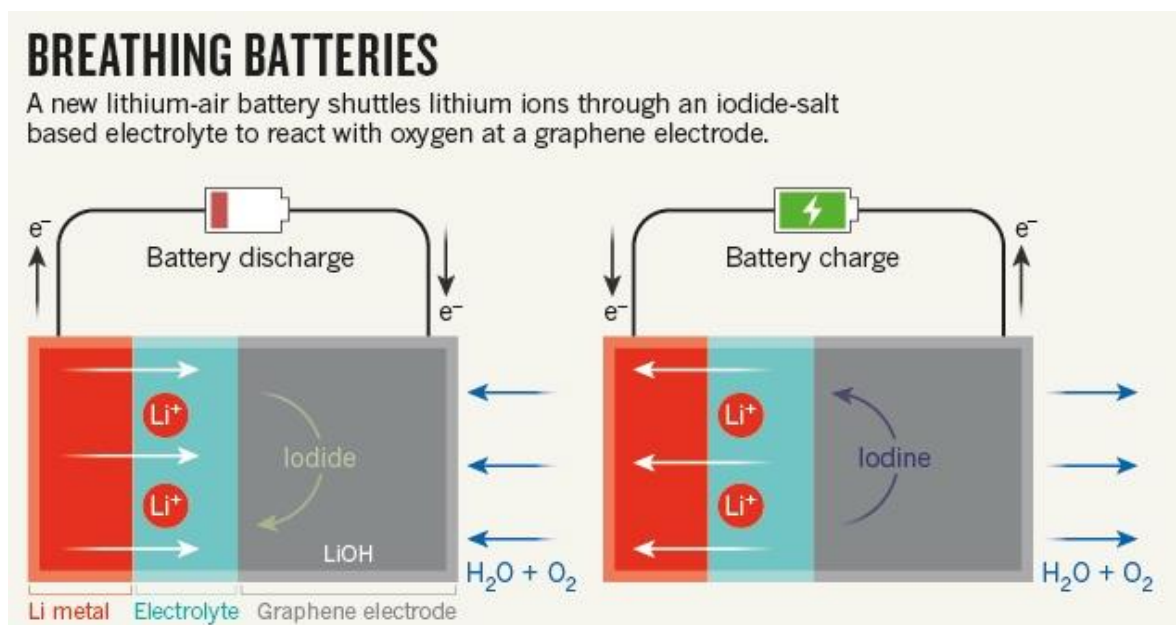


Kuva 4. Solid-state-akun erot litiumioniakkuun (Lombardo 2015).

3.5.2 Litium-ilma-akku

Litium-ilma-akussa anodi on valmistettu litiummetallista ja katodi on tyypillisesti huokoista hiilimateriaalia, joka tuo happea ympäröivästä ilmasta. Nestemäinen elektrolyytti yhdistää anodin ja katodin helpottaen samalla ionien liikkumista niiden välissä. Kun litium hapettuu, siitä purkautuu sähköä ja ladatessa prosessi kääntyy vastakkaiseen suuntaan (kuva 5). (Ball 2015; Choi 2015.) Litium-ilma-akuilla voisi olla teoriassa 13 kWh/kg:n energiatiheys, joka vastaa karkeasti bensiinin energiatiheyttä. Vertailuna Tesla Model S:n litium-ioni-akut tuottavat 248 Wh/kg. Litium-ilma-akun syklin eliniän pitää myös parantua, sillä tällä hetkellä akun sykli-ikäksi on saatu 50 lataus-purkusykliä. (Buchmann 2015; Buchmann 2016.)

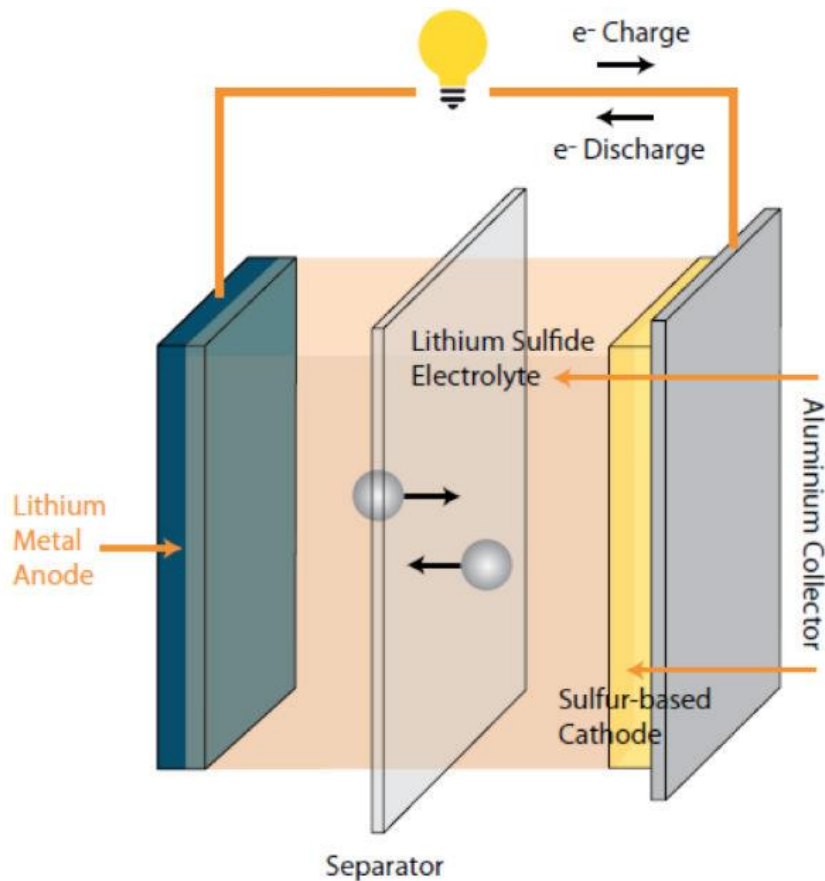
Ilman epäpuhtaudet aiheuttavat myös ongelmia litium-ilma-akulle, joten ilma pitää filteroida, ennen kuin se pääsee akulle. Yksi ongelma lisää on akun äkillinen kuolema, joka johtuu litiumin ja hapen muodostamista litium-peroksidhiukkasista. Litium-peroksidhiukkasista syntyy este, joka estää elektronien liikkeen. Tämän tuloksena akun energian varastointikapasiteetti romahtaa. Tiedemiehet koettavat ratkaista tätä ongelmaa lisäämällä lisäaineita akkuun, jotta hiukkasten syntyminen saataisiin estettyä. (Buchmann 2016.)



Kuva 5. Litiumilma-akun toimintaperiaate (Ball 2015).

3.5.3 Litium-rikkiakku

Litium-rikkiakussa anodi on valmistettu litiumista ja katodi rikistä. Litium-rikkiakkujen energiatiheys on kolminkertainen verrattuna litium-ioniakkuun. Akun purkusyklin aikana litium liukenee anodin pinnalta, ja lataussyklin aikana litium kiinnittyy takaisin anodiin (kuva 6). (Buchmann 2016; Cobb 2013.) Haasteena litium-rikkiakuissa on rajallinen sykli-ikä, joka on vain 40–50 latausta/ purkua. Sykli-ien lyhyys johtuu siitä, että rikkiä irtoaa katodista syklien aikana, ja se joutuu kosketukseen anodin litiumin kanssa. Lopulta rikin vähyys katodissa saa akun kuolemaan. Litium-rikkiakuilla on myös ongelmia pysyä vakaina korkeissa lämpötiloissa. Stanfordin yliopiston tutkijat ovat tehneet kokeita nanolangalla ja grafeenilla päästäkseen eroon ongelmista, joita litium-rikkiakulla on. He ovat saaneet kokeistaan lupaavia tuloksia. (Buchmann 2016.)



Kuva 6. Litium-rikkiakun toimintaperiaate (Cobb 2013).

3.6 Akustojen takuut

Seuraavalla sivulla oleva taulukko 1 kuvaa erimerkkisten sähköautojen takuiden kestoja. Tiedot ovat koottu valmistajien ja jälleenmyyjien verkkosivuilta. Taulukosta voidaan havaita, että takuut ovat suurimmassa osassa yhtenevät merkistä riippumatta, poikkeuksina Teslan kilometrien suhteen määrittelemätön rajoitus ja Nissanin eri akustoille määritellyt takuut.

Taulukko 1. Erimerkkisten sähköautojen akustojen takuut (Tuki. Huoltopaketit 2016; Nissan Leaf 2016; 10 questions about the e-up! 2016; BMW eDrive 2016; Drive Unit and Battery at the Heart of Chevrolet Bolt EV 2016; Warranty 2016a; Warranty 2016b; Your warranty 2016; Salo 2016).

Merkki	Takuun kesto (vuosi/ km)
Tesla Model S	Kahdeksan vuotta / 200 000 kilometriä (60 kWh:n akusto). Kahdeksan vuotta / ei kilometrirajaa (70–100 kWh:n akusto). Ei koske akun kapasiteetin alenemista, vaan ainoastaan akkupaketin vikoja.
Nissan LEAF	Suojaa yli 25 %:n kapasiteetinmenetykseltä viiden vuoden ajan / 100 000 kilometriin asti (24 kWh:n akusto) tai kahdeksan vuoden ajan / 160 000 kilometriin asti (30 kWh:n akusto) sen mukaan, kumpi raja tulee ensin vastaan.
VW e-Up	Kahdeksan vuotta tai 160 000 kilometriä.
BMW i3	Kahdeksan vuotta tai 100 000 kilometriä.
Chevrolet Bolt	Kahdeksan vuotta tai 100 000 mailia (160 930 km).
Kia Soul EV	Kymmenen vuotta tai 100 000 mailia (160 930 km).
VW Golf-e	Kahdeksan vuotta tai 100 000 mailia (160 930 km).
Ford Focus Electric	Kahdeksan vuotta tai 100 000 mailia (160 930 km).
Mercedes-Benz B-sarja Electric Driven	Kahdeksan vuotta tai 100 000 km. Kattaa akuston kapasiteetin laskun alle 80 %:iin.

4 Yhteenveto

Insinöörityössä selvisi, että kaikkien sähköautojen valmistajien akustojen hinnat ovat pudonneet vuosina 2007–2015 noin 14 % vuodessa. Sähköautoalan markkinajohtajilla akustojen hinnat ovat laskeneet vieläkin enemmän ja jatkavat laskua noin 8 % vuodessa.

Tutkiessani, kuinka suuren osuuden nykyisin sähköautojen akustot muodostavat auton kokonaishinnasta, käytin kahta autoa esimerkkeinä Chevrolet Boltia ja Tesla Model S:ää, koska oli saatavissa riittävän tarkkaa tietoa näiden autojen akustojen kustannuksista. Chevrolet Boltin kohdalla akuston osuus auton kokonaishinnasta oli noin 43 % auton myyntihinnasta. Tesla Modes S:ssä akuston hinnan osuus myyntihinnasta oli saamieni tietojen perusteella selvästi vähemmän: 14,30 %.

Näiden kahden auton kohdalla suurta eroa akuston osuudesta myyntihintaan selittää se, että autot ovat aivan eri hintaluokassa, mutta silti akuston kustannukset dollareina per kWh ovat kohtuullisen lähellä toisiaan: Chevrolet Bolt:ssa 215 \$ ja Tesla Model S:ssä 190 \$.

Tällä hetkellä markkinoita hallitsevat litiumioniakut, ja ne kehittyvät edelleen. Niille ei vielä ole todellista haastajaa. Litiumioniakun korvaajaksi on todennäköisesti tulossa solid-state-litiumakku. Myös muita akkuteknologioita on kehitteillä, mutta vielä lähitulevaisuudessa niistä ei ole litiumioniakkujen korvaajiksi.

Ongelma solid-state-akuissa on vielä se, että kiinteä litium laajenee ja supistuu lataus- ja purkusyklien aikana, ja tämä saa aikaan halkeamia litiumin pinnalla. Lataus-purkusyklin eliniän pitää kasvaa myös lähemmäksi litiumioniakun lataus-purkusykli-ikää, jotta akku olisi käyttökelpoinen sähköautoissa. Solid-state-akut voisivat olla markkinoilla vuonna 2020 ja autojen akkuina vuona 2025.

Hyödynsin Tesla Model S:lle tehtyä 80 auton tutkimusta, kun tutkin akustojen elinkaarta. Tutkimuksesta selvisi, että kyseisen auton akuston energian varastointikapasiteetti heikkeni keskimäärin 5 % ~ 50 000 km:n matkalla. (Jivan 2015.) Akuston sykli-ikää ei voi kuitenkaan tarkasti ennustaa tämän perusteella, koska akuston kapasiteetin heikeminen ei ole lineaarista.

Insinööriyössä selvisi, että yleisin sähköauton akuston takuu on 8 vuotta tai 160 000 kilometriä. Poikkeuksellisempia ovat Teslan 70–100 kWh:n akustot, joiden takuu on 8 vuotta ilman kilometrirajoitusta. Takuu kattaa huonosti toimivan tai viallisen akuston korjauksen tai vaihdon, mutta ei koske akuston kapasiteetin alenemista. Tesla antaa myös paloturvan, joka kattaa akun palamisen autolle aiheuttamat vauriot, vaikka palo johtuisi kuljettajan omasta virheestä, tietyin poikkeuksin. (Tesla Motors 2016.)

Lähteet

Arcus, Christopher. 2016. Battery lifetime: How long can electric vehicle batteries last? Verkkodokumentti. Clean technical. <<http://cleantechnica.com/2016/05/31/battery-lifetime-long-can-electric-vehicle-batteries-last/>> Päivitetty 31.5.2016. Luettu 27.6.2016.

Ball, Philip. 2015. 'Breathing battery' advance holds promise for long-range electric cars. Verkkodokumentti. Nature. <<http://www.nature.com/news/breathing-battery-advance-holds-promise-for-long-range-electric-cars-1.18683>> Julkaistu 29.10.2016. Luettu 6.7.2016.

BMW eDrive. 2016. Verkkodokumentti. BMW <<http://www.bmw.fi/fi/mallisto/i-yhteenvento/i3/2013/moottori.html>> Luettu 15.7.2016.

Buchmann, Isidor. 2015a. How do lithium batteries work? Verkkodokumentti. Battery university. <http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries> Päivitetty 3.5.2015. Luettu 27.6.2016.

Buchmann, Isidor. 2015b. Types of lithium-ion. Verkkodokumentti. Battery university. <http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion> Päivitetty 7.5.2016. Luettu 27.6.2016.

Buchmann, Isidor. 2015c, Battery breakthroughs – myth or fact?. Verkkodokumentti. Battery university. <http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_breakthroughs_myth_or_fact> Päivitetty 21.5.2015. Luettu 5.7.2016.

Buchmann, Isidor. 2016. Future batteries. Verkkodokumentti. Battery university. <http://batteryuniversity.com/learn/article/experimental_rechargeable_batteries> Päivitetty 4.7.2016. Luettu 5.7.2016.

Choi, Charles Q. 2015. Leap in Lithium-Air Battery Tech Could Supercharge Electric Cars. Verkkodokumentti. Spectrum. <<http://spectrum.ieee.org/energywise/transportation/advanced-cars/big-leap-in-lithium-air-battery-tech>> Julkaistu 29.10.2015. Luettu 4.7.2016.

Cobb, Jeff. 2013. OXIS Jump-Starts First Commercialization Of Lithium-Sulfur Batteries. Verkkodokumentti. Hybrid cars. <<http://www.hybridcars.com/oxis-jump-starts-first-commercialization-of-lithium-sulfur-batteries/>> Julkaistu 26.7.2013. Luettu 4.7.2016.

Drive Unit and Battery at the Heart of Chevrolet Bolt EV. 2016. Verkkodokumentti. Chevrolet.

<<http://media.chevrolet.com/media/us/en/chevrolet/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2016/Jan/naias/chevy/0111-bolt-du.html>> Päivitetty 11.1.2016. Luettu 1.7.2016.

Introducing the All-Electric 2017 Chevrolet BoltEV. 2016. Verkkodokumentti. Chevrolet. <<http://www.chevrolet.com/bolt-ev-electric-vehicle.html>> Luettu 1.7.2016.

Jivan, Jon. 2015. Tesla Model S battery degradation shown to level off at 5% after 30,000 miles. Verkkodokumentti. Electrek. <<http://electrek.co/2015/05/08/tesla-model-s-battery-degradation-shown-to-level-off-at-5-after-30000-miles/>> Julkaistu 8.5.2015. Luettu 8.7.2016.

Lambert, Fred. 2016. Tesla Model S battery pack data shows very little capacity loss over high mileage. Verkkodokumentti. <Tesla Model S battery pack data shows very little capacity loss over high mileage> Julkaistu 6.6.2016. Luettu 2.10.2016.

Leitman, Seth & Brand, Bob. 1994. Build your own electric vehicle. New York: McGraw-Hill.

Linja-aho, Vesa. 2016a. Ostaisinko sähköauton? Helsinki: Into Kustannus Oy.

Linja-aho. 2016b. Metropolia ammattikorkeakoulu. Keskustelu 30.9.2016.

Lithium Ion. 2016. Verkkodokumentti. Panasonic.

<<https://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf2/ACA4000/ACA4000C50.pdf>> Luettu 2.10.2016.

Lombardo, Tom. 2015. Solid state battery could double electric vehicle range. Verkkodokumentti. Engineering.com

<<http://www.engineering.com/ElectronicsDesign/ElectronicsDesignArticles/ArticleID/10>

689/Solid-State-Battery-Could-Double-Electric-Vehicle-Range.aspx> Päivitetty 20.9.2015. Luettu 27.6.2016.

Nissan Leaf. 2016. Suorituskyky ja akku. Verkkodokumentti. Nissan. <<https://www.nissan.fi/ajoneuvot/henkilautot/leaf/suorituskyky-akku.html>> Luettu 15.7.2016.

Nykvist, Björn & Nilsson, Måns. 2015a. Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. Nature climate change, Vol. 5, s. 329-332.

Nykvist, Björn & Nilsson, Måns. 2015b. Systematic review of EV battery pack costs suggests economies of scale may push cost toward US\$200/kWh without further cell chemistry improvements. Verkkodokumentti. Green car congress. <<http://www.greencarcongress.com/2015/04/20150420-bevs.html>> Päivitetty 20.4.2015. Luettu 30.6.2016.

Rand, D. A. J., Woods, R. & Dell R. M. 1998. Batteries for electric vehicles. Tauton: Research studies press ltd.

Randall, Tom. 2016. Here´s how electric cars will cause the next oil crisis. Verkkodokumentti. Bloomberg. <<http://www.bloomberg.com/features/2016-ev-oil-crisis/>> Julkaistu 25.2.2016. Luettu 30.6.2016.

Salo, Sebastian. 2016. Veho Airport. Keskustelu 1.7.2016.

Tuki. Huoltopaketit. 2016. Verkkodokumentti. Tesla Motors. <https://www.tesla.com/fi_FI/support/service-plans> Luettu 15.7.2016.

Voelcker, John. 2016. Electric-car battery costs: Tesla \$190 per kwh for pack, GM \$145 for cells. Verkkodokumentti. Green car report. <http://www.greencarreports.com/news/1103667_electric-car-battery-costs-tesla-190-per-kwh-for-pack-gm-145-for-cells> Julkaistu 28.4.2016. Luettu 1.7.2016.

Warranty. 2016a. Verkkodokumentti. Kia Motors America, Inc. <http://www.kia.com/us/en/content/ev-faqs_2016/soul-ev-specifics/warranty> Luettu 15.7.2016.

Warranty. 2016b. Verkkodokumentti. Volkswagen of America.

<<http://www.vw.com/models/e-golf/trims/2016/sel-premium-trim/>> Luettu 5.7.2016.

Your warranty. 2016. Verkkodokumentti. Ford Motor Company.

<<https://owner.ford.com/tools/account/maintenance/your-warranty/warranties-search-results.html?make=Ford&model=Focus%20Electric&year=2016>> Luettu 15.7.2016.

10 questions about the e-up! 2016. Verkkodokumentti. Volkswagen.

<<http://magazine.volkswagen.co.uk/e-up-electromobility-engineering.html>> Luettu 15.7.2016.