



Nikolas Pajuhi

Sähköautojen historia ja kehitys

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

8.12.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Nikolas Pajuhi
Otsikko:	Sähköautojen historia ja kehitys
Sivumäärä:	42 sivua
Aika:	8.12.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka
Ammatillinen pääaine:	Autosähkötekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Heikki Parviainen

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on tarkastella laajasti sähkö- ja hybridautojen akuston, tehoelektroniikan sekä sähkömoottorin toimintaa ensimmäisistä sähköautoista tähän päivään.

Opinnäytetyö on toteutettu kirjallisuustutkimuksena. Työssä esitellään akkujen kehityminen ja varteenotettavimmat keinot energian säilömiseen aina hankaussähkön talteenotosta uusimpiin litiumioniakkuihin. Työssä tarkastellaan hieman myös tulevaisuuden akkutyyppisiä. Sähkömoottorin kehitystä tarkastellaan ensimmäisistä jättikokoisista, tehottomista moottoreista tämän päivän pieniin kehittyneisiin kolmivaihe-moottoreihin. Varsinaisesti sähköautoihin perehdytään ensimmäisistä sähkökulkuneuvoksi muutetuista hevosvaunuista Teslan aikaansaamaan tämän päivän sähköautojen suosioon.

Työn lopputulemana voidaan todeta, että sähköautot ovat yleistymässä ja suosio varmasti lisääntyy akkukemian kehittyessä ja latausaikojen lyhentyessä.

Avainsanat: Sähköauto, sähköajoneuvo, akku, sähkömoottori

Abstract

Author: Nikolas Pajuhi
Title: Development and History of Electric Cars

Number of Pages: 42 pages
Date: 8 December 2022

Degree: Bachelor of Engineering

Degree Programme: Automotive Engineering

Professional Major: Automotive Electronics Engineering

Instructors: Heikki Parviainen, Senior Lecturer

The purpose of this thesis was to extensively examine the operation of the battery, power electronics and the electric motor of electric and hybrid cars from the first electric cars to the present day.

This thesis was carried out as a literature study. The work presents the development of batteries and the most viable ways to store energy, from the recovery of frictional electricity to the latest lithium-ion batteries. The work discusses also the future battery types. The development of the electric motor is examined from the first gigantic, inefficient motors to today's small advanced three-phase motors. Actually, electric cars will be introduced from the first horse-drawn carriages converted into electric vehicles to the popularity of today's electric cars brought about by Tesla.

As a result of the thesis, it can be stated that electric cars are becoming more common and their popularity will certainly increase as battery chemistry is developing and charging times are getting shorter.

Keywords: Electric car, Electric vehicle, Development, History

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Akun toimintaperiaate	2
3	Akkujen kehitys	3
3.1	Voltan pylväs	4
3.2	Daniellin pari	5
3.3	Lyijyakku	6
3.4	Nikkeli-kadmiumakku (NiCd)	7
3.5	Nikkeli-rauta-akku (NiFe)	8
3.6	Nikkeli-metallihydridiakku (NiMH)	9
3.7	Litiumioniakut (Li-ion)	11
3.7.1	Litium-kobolttioksidi	12
3.7.2	Litium-mangaanioksidi	13
3.7.3	Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi	13
3.7.4	Litium-rautafosfaatti	14
3.7.5	Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi	14
3.7.6	Litium-titaanioksidi (litium-titanaatti)	14
3.8	Litiumioniakkujen tulevaisuus	15
3.9	Sinkki-ilma-akku	16
4	Sähkömoottorien kehitys	16
4.1	Sähkömoottorin toimintaperiaate	17
4.2	Ensimmäinen sähkömoottori	17
4.3	DC-moottorit	18
4.4	Kolmivaihemoottori	20
5	Sähköauto	22
5.1	Ensimmäiset sähköautot (1830–1880)	23
5.2	Sähköautot liikenteessä (1890–1914)	24
5.3	Polttomoottori syrjäyttää sähkömoottorin (1914–1970)	29
5.4	Sähköajoneuvojen paluu (1970–2003)	33
5.5	Sähköautojen vallankumous (2003–2020)	36

5.6	Käännekohta (2020 eteenpäin)	37
5.7	Sähköisen autoilun tulevaisuus	38
6	Lopuksi	39
	Lähteet	40

Lyhenteet ja käsitteet

Anodi: Negatiivinen elektrodi (miinusnapa).

BEV: Battery electric vehicle, täyssähköauto.

Elektrodi: Akun navat, joihin johtimet kiinnitetään.

Elektrolyytti:

Aine, jossa ionit kuljettavat liikkeessaan sähkövarauksia.

EV: Electric vehicle, sähköauto.

HEV: Hybrid electric vehicle, sähköhybridauto.

IEA: International energy agency, kansainvälinen energiajärjestö.

Katodi: Positiivinen elektrodi (plus napa).

LIB: Lithium-ion battery, litiumioniakku.

Napajännite:

Kuormitetun akun tai pariston jännite.

Nimellisjännite:

Tarkoituksenmukainen likimääräinen jännitteen arvo, jota käytetään merkitsemään tai tunnistamaan järjestelmä.

PHEV: Plugin hybrid electric vehicle, latauspistokehybridi.

Prismaattinen kenno:

Muodoltaan levyä muistuttava akku (esimerkiksi matkapulelimen akku).

Spinelli rakenne:

3D-rakenne, jota käytetään litiumioniakuissa.

SSB: Solid state battery, kiinteä elektrolyyttinen akku.

1 Johdanto

Tämän kirjallisuustutkimuksena toteutetun opinnäytetyön tarkoitus on tarkastella sähkö- ja hybridautojen akuston, tehoelektroniikan sekä sähkömoottorin toimintaa ensimmäisistä sähköautoista tähän päivään.

Ensimmäiset sähköautot nähtiin liikenteessä jo 1800-luvun lopulla. Mihin ne katosivat liikenteestä ja ihmisten mielestä sadaksi vuodeksi, ja miksi ne tekevät nyt vahvaa nousua? Työssä esitellään akkujen kehittyminen ja varteenotettavimmat keinot energian säilömiseen aina hankaussähkön talteenotosta uusimpiin litiumioniakkuihin. Työssä tarkastellaan hieman myös tulevaisuuden akkutyyppejä, joista saa vielä monin verroin enemmän energiaa. Sähkömoottorin kehitystä tarkastellaan ensimmäisistä jättikokoisista, tehottomista moottoreista tämän päivän pieniin kehittyneisiin kolmivaihemoottoreihin. Varsinaisesti sähköautoihin perehdytään ensimmäisistä sähkökulkuneuvoksi muutetuista hevosvaunuista Teslan aikaansaamaan tämän päivän sähköautojen suosioon. Väliin mahtuu paljon ylä- ja alamäkiä sähköautojen historiassa ja kehityksessä.

Huoli ympäristöstä on viime vuosina antanut uutta intoa kehittää vaihtoehtoisia käyttövoimia, ja sähkö on tällä hetkellä potentiaalisin vaihtoehto; sähköä kun voi tuottaa lähes päästöttömästi.

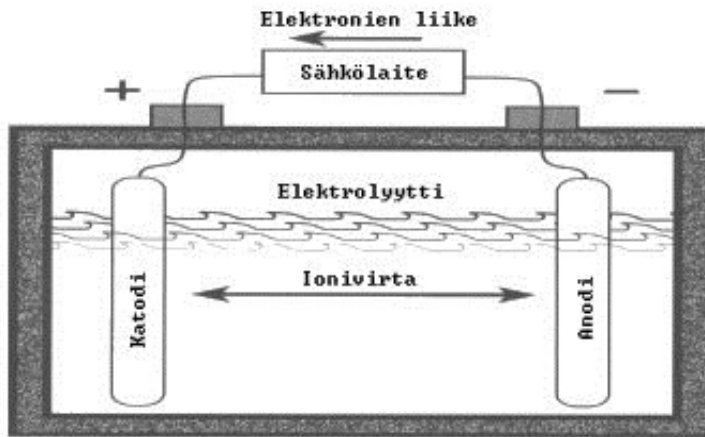
Akkuteknologian ja sähkömoottorien kehitys sitten 1800-luvun lopun on mahdollistanut sähköautojen nousun monella tavoin polttomoottoriautoa paremmaksi vaihtoehdoksi. Sähkömoottorin hyötysuhde sekä akkumateriaalit ja niiden paino mahdollistavat jo huomattavan pitkän toimintasäteen, pikalataus mahdollistaa suhteellisen nopean ”tankkauksen”, ja sähkön hinta verrattuna jatkuvasti nousevaan fossiilisten polttoaineiden hintaan on varmasti houkutteleva syy vaihtaa sähköautoon.

2 Akun toimintaperiaate

Akku on sähkökemiallinen laite, joka varastoi energiaa kemiallisesti, ja se on purettavissa sähköenergiana. Se koostuu kahdesta elektrodista sekä väliaineesta eli elektrolyytistä, joka estää elektrodien kontaktin, mutta sallii ionien liikumisen elektrodien välillä. Varsinaiset kemialliset reaktiot tapahtuvat elektrolyytin ja elektrodien rajapinnoissa. Nämä kemialliset reaktiot ovat hapettumis-pelkistymisreaktioita. Akun purkautuessa toisella elektrodista, jota kutsutaan anodiksi, vapautuu hapettumisen yhteydessä elektroneja. Nämä vapautuneet elektronit kulkevat ulkoisen piirin kautta anodilta positiivisesti varautuneelle elektrodille eli katodille, aiheuttaen näin sähkövirran. Katodille saapuvat elektronit saavat aikaan pelkistymisreaktion, eli katodilla olevat ionit vastaanottavat elektroneja. [1]

Akkua ladattaessa nämä reaktiot tapahtuvat vastakkaiseen suuntaan. Akun lähdējännite riippuu elektrodimateriaaleista ja ensisijaisesti niiden hapettumis-pelkistymispyrkimyksistä. Elektrodien välinen jännite saadaan niiden normaalipotentialien avulla, kun elektrodien normaalipotentialit vähennetään keskenään. Normaalipotentiali on vetyelektrodin, jonka potentiaaliksi on sovittu 0 volttia, ja elektrodin välinen jännite. Tätä vetyelektrodia kutsutaan normaalivetyelektrodiksi. Käytännössä akut rakennetaan kennoista, jotka ovat edellä kuvatun kaltaisia pieniä akkuja. Näitä kennoja sarjaan kytkemällä saadaan halutun suuruinen

jännite. Tällä hetkellä on käytössä kolme erityyppistä pienakkua: nikkeli-kadmium (NiCd), nikkeli-metallihydridi (NiMH) ja litiumioni (Li-ion). [1]



Kuva 1. Akun toimintaperiaate [1]

Vaikka akkujen toimintaperiaate on teoriassa melko yksinkertainen, on käytössä silti vain harvoja eri akkutyyppejä. Akkujen kehitys on pitkälinen prosessi, sillä suunnittelussa on otettava huomioon monia eri näkökohtia ja näistä on saatava aikaan mahdollisimman hyvä kompromissi. Tärkeimpiä huomioon otettavia asioita ovat koko, paino ja se, kuinka paljon akku pystyy varastoimaan energiaa. Lisäksi akkuja suunniteltaessa on otettava huomioon hinta, valmistusmenetelmät, käyttöikä, turvallisuus ja nykyään myös ympäristöystävällisyys. [1]

3 Akkujen kehitys

Staattinen sähkö eli hankaussähkö tunnettiin jo noin 600 vuotta ennen ajanlaskun alkua, mutta vasta 1700-luvulla sen tutkimuksissa saavutettiin huomattava edistys, kun kitkalla tuotettuja varauksia pystyttiin varastoimaan kondensaattoreihin. Hankaussähkön aikaansaama varaus ja sen purkautuminen tuotti kuitenkin niin lyhyen hetken kestävänsä sähkövirran, ettei sen kemiallisia vaikutuksia pystytty tutkimaan. [2]

3.1 Voltan pylväs

Vuonna 1780 italialainen anatomian professori Luigi Galvani huomasi tutkimuksissaan, että irrotetun sammakon jalan reisilihaks saatiin nykimään yhdistämällä se toisiinsa kytkettyihin kahteen eri metalliin. Vuonna 1780 selitystä sähkövirralle ei keksitty, joten Galvani käytti ilmiöstä nimeä eläinsähkö. Nykyään ilmiö tunnetaan galvanismina. [2]

Toinen italialainen, Alessandro Volta, tutki myös sähkökemialla eikä ollut täysin samaa mieltä Galvanin kanssa. Hän osoitti vuonna 1800, ettei ilmiö johdu sammakon reisistä, vaan on myös toistettavissa kudosnestettä muistuttavalla suolaliuoksella ja kahdella eri metallilla, jotka on liitetty toisiinsa. Jos kaksi erilaista metallia (kupari (katodi) ja sinkki (anodi)) asetettiin suolaveden kasteltua kartonkia vasten, metalleihin kytketyssä johtimessa kulki sähkövirta. Kyseessä oli ensimmäinen sähköpari. [2; 3]

Jokainen kupari-sinkkilevypari tuotti 0,76 voltin jännitteen, ja Volta huomasi, että ilmiö oli sitä voimakkaampi, mitä useampia pareja asetettiin pylvääksi (kuva 2). [2; 3]



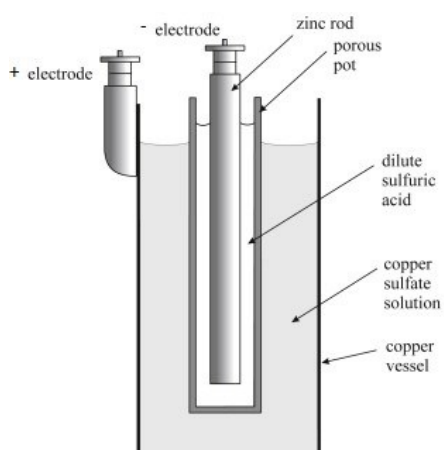
Kuva 2. Voltan pylväs [4]

Voltan pylvään avulla pystyttiin myös ensimmäistä kertaa hajottamaan vesimolekyylit hapeksi ja vedyksi. Myöhemmin muitakin alkuaineiksi luultuja yhdisteitä hajotettiin Voltan pylväällä atomeiksi. Voltan mukaan nimettiin jännitteen yksikkö voltti. [2]

Voltan pylvään huonona puolena mainittakoon, että kun piirissä kulki sähkövirta ja elektrolyytistä vapautui pieniä vetykuplia, ne kiinnittyivät kuparilevyn pinnalle kasvattaen sisäistä resistanssia. Kun sisäinen resistanssi kasvoi, niin napajännite laski. [5]

3.2 Daniellin pari

Englantilainen kemian professori John Frederic Daniell keksi ratkaisun Voltan pylvään vetykuplaongelmaan. Hän käytti toista elektrolyyttiä kuluttamaan ensimmäisen tuottamaa vetyä. Vuonna 1836 hän kehitti Daniellin parin (kuva 3), joka koostui kuparisulfaattiliuoksella täytetystä kupariastiasta (positiivinen elektrodi), jonka sisällä kellui rikkihapolla täytetty keraaminen astia. Keraamisen astian sisällä, rikkihapon seassa, oli sinkkisauva (negatiivinen elektrodi). Keraaminen astia on huokoinen ja päästää ioneja läpi, mutta estää liuoksia sekoittumasta keskenään. [6; 7]



Kuva 3. Daniellin pari [8]

Daniellin pari oli suuri parannus senhetkiseen teknologiaan ja käytössä olleisiin paristoihin. Daniellin pari oli ensimmäinen käytännöllinen energianlähde ja takasi luotettavamman virran tuotannon kuin Voltan pylväs. Se tarjosi noin 1,1 voltin napajännitteen ja oli myös edeltäjäänsä turvallisempi, sillä se ei ollut yhtä syövyttävä. Daniellin parista tuli pian uusien sähkösanomaverkkojen standardivirtalähde. [6]

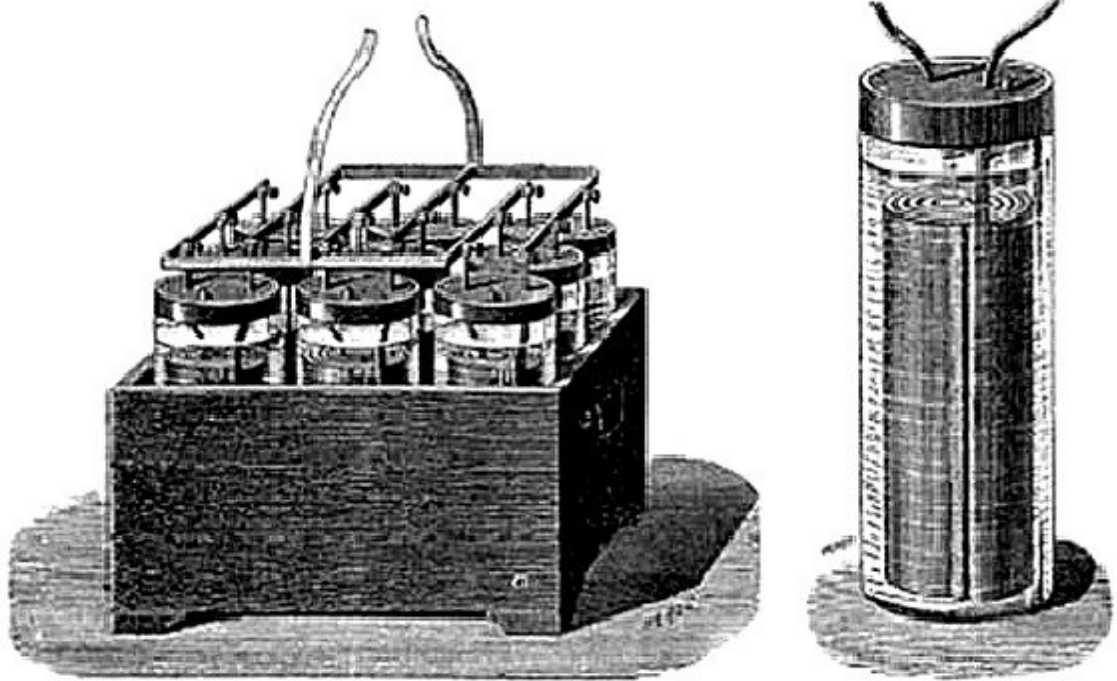
Seuraavien vuosikymmenien aikana useat keksijät kehittivät Daniellin parista edistyksellisempiä versioita muun muassa eri elektrolyyteillä ja metalliyhdistelmillä, mutta periaate oli sama.

3.3 Lyijyakku

Vuoteen 1859 asti kaikki olemassa olevat sähköparit tyhjenivät pysyvästi, kun niiden kemialliset reaktiot oli käytetty loppuun. Vuonna 1859 ranskalainen fyysikko Gaston Planté keksi lyijyakun (kuva 4), ensimmäisen ladattavan akun. [8; 10]

Ensimmäinen malli akusta sisälsi kaksi lyijylevyä, jotka erotettiin toisistaan kuminauhalla, rullattiin spiraaliksi ja upotettiin kymmenen prosenttiseen rikkihappoon. Toinen lyijylevyistä oli negatiivinen elektrodi (anodi) ja toinen lyijyoksidilevy oli positiivinen elektrodi (katodi). Akkuvarausta purettaessa elektrolyytti johdattaa elektroneja anodilta katodille. [8; 10]

Vuonna 1860 Planté esitteli akun, joka koostui yhdeksästä edellä mainitusta elementistä sarjaan kytkettynä ja suojakoteloon asetettuna. Plantén keksimän akun kennojännite oli jopa 2 voltia, joten yhdeksän sarjaan kytketyn kennon kokonaisjännitteeksi saatiin 18 voltia. Tänäkin päivänä polttomoottorit käynnistetään Plantén keksinnöllä. [8; 10]

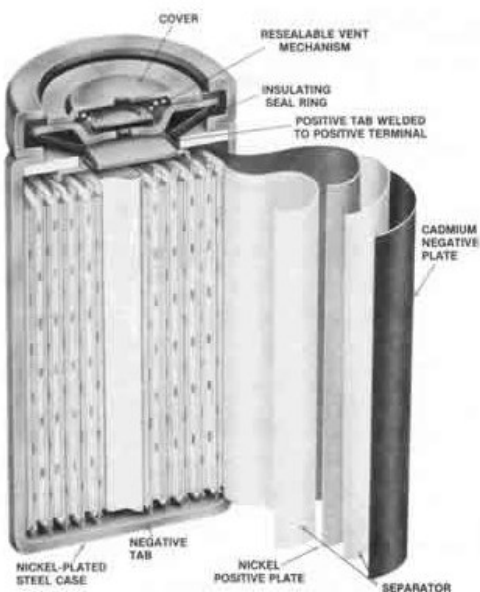


Kuva 4. Plantén sarjaan kytketyt lyijykennot [9]

3.4 Nikkeli-kadmiumakku (NiCd)

Vuonna 1890 ruotsalainen insinööri Waldemar Jungner sai junassa istuessaan ajatuksen akusta, jossa olisi kulumaton elektrolyytti. Elektrolyytin tehtävä olisi vain johtaa sähkövirtaa, ei osallistua virran tuottavaan kemialliseen reaktioon, joka kuluttaisi sitä kuten lyijyakussa. Tuohon aikaan ainoa ladattava akku oli Plantén keksimä lyijyakku, joka oli painava ja sisälsi happoa. Jungner kokeili useita eri metalleja, joilla oli parempia ominaisuuksia kuin lyijyllä. Hänen tarkoituksenaan oli kehittää akku, joka kestäisi ja toimisi äärimmäisissä olosuhteissa. [11]

Vuonna 1899 Jungner sai valmiiksi nikkeli-kadmiumakun (NiCd), ensimmäisen alkaliakun (kuva 5). Akussa nikkeli oli positiivinen elektrodi eli katodi, kadmium oli negatiivinen elektrodi eli anodi ja elektrolyytinä oli alkali liuos. Siitä tuli erittäin toimintavarma ja kestävä, mutta se ei lopulta kuitenkaan menestynyt kovin hyvin kalliiden raaka-aineidensa vuoksi. NiCd-akkujen myynti kuluttajille lopetettiin vuonna 2009, sillä kadmium on ympäristömyrkky. [10; 11; 12.]



Kuva 5. Nikkeli-kadmiumakku [10]

3.5 Nikkeli-rauta-akku (NiFe)

Vuonna 1899 Jungner patentoi nikkeli-rauta-akun. Se oli halvempi vaihtoehto nikkeli-kadmiumakulle, mutta hän ei ollut kuitenkaan tyytyväinen siihen, sillä se tuotti paljon enemmän vetyä ladattaessa eikä sitä voinut koteloida. [11]

Samoihin aikoihin yhdysvaltalainen keksijä Thomas Alva Edison kehitti omaa alkaliakkuaan. Hänen mielestään lyijy oli liian painava materiaali käytettäväksi akuissa ja hapon käyttäminen yhdessä minkä tahansa metallin kanssa oli luonnostaan huono ajatus. Edison ”keksi uudestaan” nikkeli-rauta-akun; hänen akussaan rauta oli anodi, nikkelioksidi katodi ja KOH (kaliumhydroksidi) elektrolyytti. Edison patentoi nikkeli-rauta-akun (kuva 6) kaksi vuotta Jungnerin patentin jälkeen, ja heille syntyi pitkä patenttikiista. Edison, jolla oli suuret taloudelliset resurssit, lopulta voitti kiistan ja sai patentin. [9; 11]

Nikkeli-rauta-akku oli erittäin kestävä ja varmatoiminen. Edison uskoi, että tämä olisi juuri oikea akkutyyppi sähköautoihin, ja yhdessä Henry Fordin kanssa he alkoivat suunnitella edullista sähköautoa. Öljy-yhtiöiden uskotaan kannustaneen

Fordia käyttämään bensiinimoottoria autoissaan, ja niin hän lopulta lopetti kokonaan sähköautojen kehittämisen ja tuotannon. [13]

Vuonna 1972 Exide osti Edisonin akkuyrityksen ja lopetti kokonaan nikkeli-rauta-akkujen tuotannon. Useiden lähteiden mukaan syynä oli NiFe-akkujen ”loputon” käyttöikä. Kun nikkeli-rauta-akkujen valmistus lopetettiin, hälväni ajan myötä tieto myös siitä, että yksinkertainen elektrolyytin vaihto saisi nämä akut taas uuden veroisiksi, ja loppuun käytetyt akut heitettiin suurilta osin pois. [13]



Kuva 6. Edisonin NiFe-akku [9]

3.6 Nikkeli-metallihydridiakku (NiMH)

Vuonna 1986 amerikkalainen keksijä Stanford Ovshinsky patentoi nikkeli-metallihydridiakun (kuva 7). NiMH-akussa käytettiin katodina nikkelihydroksidia, anodina toimi vetyä sitova metalliseos (tavallisesti lantaanin ja muiden harvinaisten maametallien seos) ja elektrolyytti oli tuttu kaliumhydroksidi (KOH). NiMH-akku muistutti pääpiirteittäin paljon nikkeli-kadmiumakkua, mutta ympäristölle myrkyllinen kadmium korvattiin metalliseoksella. NiMH-akun varauskapasiteetti NiCd-akkuun nähden oli kaksinkertainen ja se tuotti 1.2 voltin nimellisjännitteen. [14; 15]

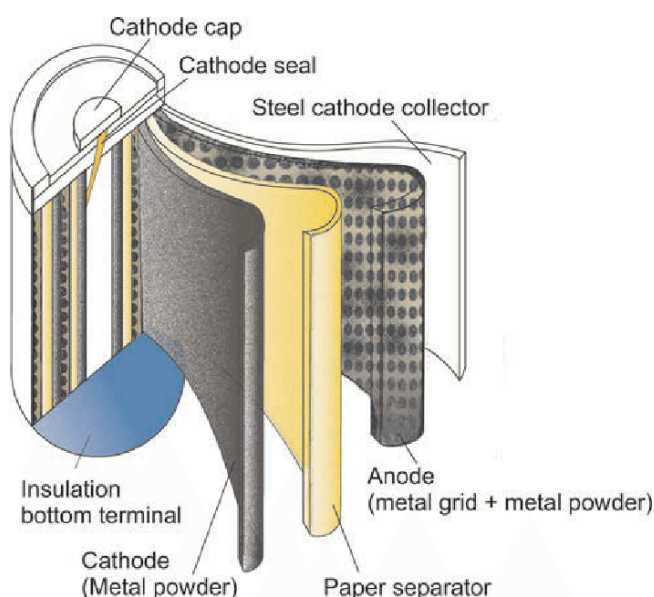
Nikkeli-metallihydridiakun peruskonsepti syntyi 1970-luvulla tehdystä vedyn varastoinnin tutkimuksesta vaihtoehtoisena energialähteenä. Tiettyjen metalliseosten havaittiin muodostavan hydridejä, jotka kykenivät varastoimaan ja vapauttamaan vetyä lähes tuhat kertaa oman tilavuutensa verran. Seoksen ai-

nesosien ja seossuhteiden huolellisella valinnalla termodynamiikka voitiin tasapainottaa niin, että absorptio- ja vapautumisprosessi saatiin toimimaan myös huoneenlämmössä ja -ilmanpaineessa. [15]

NiMH-akut olivat erittäin tervetullut komponentti matkapuhelimien ja kannettavien tietokoneiden kaupallistamiseen 1980-luvun lopulla ja 1990-luvulla [14].

Vaikka NiMH-teknologia tarjosi valtavia parannuksia edeltäjiinsä nähden, oli siinä useita keskeisiä puutteitakin. NiMH-akuissa oli erittäin korkea itsepurkautumisaste, mikä tarkoitti usein sitä, että akut saapuivat käyttäjälle täysin tyhjinä, ja ne saattoivat menettää kapasiteettiaan pysyvästi pitkäaikaisen tyhjiällä varastoinnin aikana. [14]

Matkapuhelinvalmistajien kehittäessä yhä pienempiä puhelimia NiMH-akkuvalmistajien oli vaikea pysyä perässä, sillä ohuen kennon valmistaminen oli sekä kallista että hankalaa. Hankalaa siitä teki suhteellisen jäykkien materiaalien kiertäminen yhä pienemmiksi rulliksi. Kun matkapuhelin akkujen vaatimus alitti 10mm paksuuden, alkoi kamppailu luotettavien ja kustannustehokkaiden prismaattisten kennojen valmistamisesta. Litiumioniakut valloittivat nopeasti markkinat ohuemmilla akuillaan ja korkeammalla energiatiheydellään. [14]



Kuva 7. Nikkeli-metallihydridiaku [16]

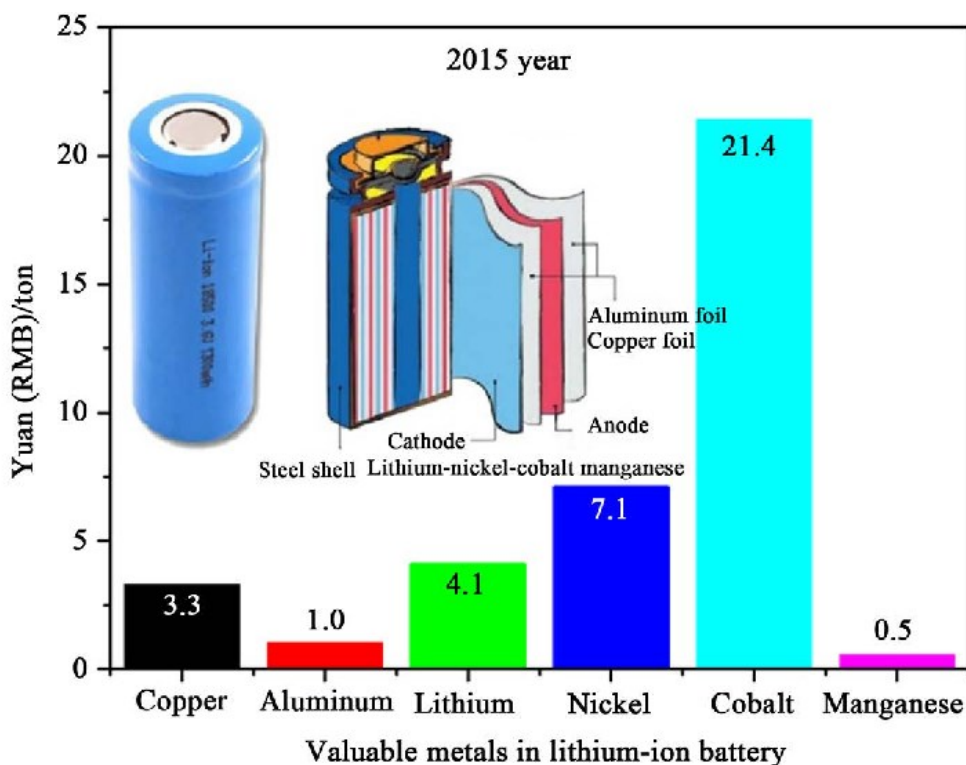
3.7 Litiumioniakut (Li-ion)

Litiumioniakut (kuva 8) ovat osa jokapäiväistä elämäämme matkapuhelimista sähköautoihin. Vuonna 2019 kolme tutkijaa, John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham ja Akira Yoshino, palkittiin Nobelin kemian palkinnolla litiumioniakun kehittämisestä. [18]

Litiumioniakkujen todellinen kehitys alkoi 1970-luvulla öljykriisin aikoihin. Tuolloin Exxon Mobilille työskennellyt nuori kemisti Stanley Whittingham alkoi kehittää akkua, joka latautuisi lyhyessä ajassa ja johtaisi ehkä jonain päivänä fossiilivapaaseen energiaan. Hänen ensimmäisessä litiumioniakussa litium oli anodi ja titaanidisulfidi katodi. Yhdistelmä aiheutti kuitenkin useita haasteita ja vakavia turvallisuusriskejä. Pelättiin, että titaanidisulfidi voisi reagoida muiden aineiden kanssa muodostaen erittäin vaarallista rikkivetyä, ja kun akut oikosulkivat itsensä ja syttyivät palamaan, Exxon Mobil päätti keskeyttää kokeet. [17; 18]

John B. Goodenough oli Texasin yliopiston professori, jolla oli toisenlainen ajatus samaisesta litiumioniakusta. 1980-luvulla hän kokeili litium-kobolttioksidin käyttöä katodina titaanidisulfidin sijasta, ja se kannatti, sillä akun energiapotentiaali kaksinkertaistui. [18]

Viisi vuotta myöhemmin Akira Yoshino Meijon yliopistosta Japanista keksi vaihtaa anodin reaktiivisesta litiumista hiilipitoiseen öljykoksiin ja havaitsi akun olevan huomattavasti turvallisempi ilman litiumia mutta myös vakaampi suorituskyvyltään. [17; 18]



Kuva 8. Litiumioniakku [19]

Tänä päivänä kuusi yleisintä litiumioniakkukemiaa ovat litium-kobolttioksidi (LiCoO_2) eli LCO, litium-mangaanioksidi (LiMn_2O_4) eli LMO, litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi (LiNiMnCoO_2) eli NMC, litium-rautafosfaatti (LiFePO_4) eli LFP, litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi (LiNiCoAlO_2) eli NCA sekä litium-titaanioksidiakku (litiumtitanaatti (Li_2TiO_3)) eli LTO. [20]

3.7.1 Litium-kobolttioksidi

LCO-akkuja käytetään niiden korkean energiatiheyden vuoksi paljon muun muassa matkapuhelimissa, kannettavissa tietokoneissa ja digitaalikameroissa. Akku koostuu kobolttioksidikatodista ja grafiittianodista. Katodissa on kerrosrakente, ja purkautumisen aikana litiumionit kulkevat anodilta katodille, kun taas ladatessa ionit kulkevat katodilta anodille. Litium-koboltin haittapuolina mainittakoon suhteellisen lyhyt käyttöikä sekä rajoitettu ominaisteho. Uudemmissa akuissa on nikkeliä, mangaania ja/tai alumiinia parantamassa käyttöikä. LCO-akut ovat menettämässä suosiotaan koboltin korkeiden kustannusten vuoksi. [20]

3.7.2 Litium-mangaanioksidi

Litiumioniakku mangaanispinellillä nähtiin ensimmäisen kerran Materials research bulletin lehden julkaisussa vuonna 1983. Moli energy kaupallisti vuonna 1996 litiumioniakun, jossa oli litium-mangaanioksidikatodi. Arkkitehtuuri muodostaa kolmiulotteisen spinellirakenteen, joka parantaa ionivirtausta elektrodilla ja jolla on alhaisempi sisäinen resistanssi. [20]

Alhaisen sisäisen resistanssin vuoksi LMO-akku on mahdollista ladata ja purkaa erittäin nopeasti. 18650-akku purettaessa 20–30 ampeerin virralla pysyy akun lämpötila vielä kohtuullisena. Lyhyissä sekunnin kuormituksissa akku voidaan purkaa jopa 50 ampeerin virralla, mutta akun lämpötila ei saa nousta yli 80 celsiusastetta. LMO-akkuja käytetään sähkötyökaluissa, lääketieteellisissä instrumenteissa sekä hybridi- ja sähköajoneuvoissa. [20]

Usein litium-mangaania sekoitetaan litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidin kanssa, jotta kummankin akkutyypin parhaat ominaisuudet saataisiin esille. Useat sähköautot, muun muassa Nissan Leaf ja BMW I3, käyttävät tätä akkuyhdistelmää, sillä akun LMO-osa tarjoaa paljon virtaa kiihdytyksiin ja NMC-osa taas pitkän ajomatkan. [20]

3.7.3 Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi

Yksi menestyneimmistä Li-ion-akuista on nikkeli-mangaani-kobolttikatodiyhdistelmä. Litium-mangaanin tapaan NMC-akutkin voidaan räätälöidä käyttötarpeen mukaan joko varastoimaan paljon energiaa tai antamaan paljon tehoa. Esimerkiksi yhden 18650-akun kapasiteetti voi olla 2800 mAh antaen virtaa 4–5 ampeeria, kun taas toisen NMC-akun kapasiteetti on vain 2000 mAh, mutta se pystyy antamaan jatkuvan 20 ampeerin virran. [20]

NMC:n salaisuus piilee nikkelin ja mangaanin yhdistämisessä. Nikkeli tunnetaan suuresta ominaisenergiastaan mutta huonosta stabiiliudestaan. Mangaanilla

taas on se etu, että se muodostaa spinellirakenteen saavuttaen alhaisen sisäisen resistanssin, mutta sen ominaisenergia on pieni. Yhdistettynä nämä metallit parantavat toistensa ominaisuuksia. [20]

3.7.4 Litium-rautafosfaatti

Vuonna 1996 Texasin yliopistossa keksittiin käyttää fosfaattia katodimateriaalina. Litium-fosfaatti tarjoaa hyvän sähkökemiallisen suorituskyvyn ja alhaisen resistanssin. Tärkeimpiä ominaisuuksia ovat suuri purkuvirta, pitkä käyttöikä sekä parantunut turvallisuus. Litium-fosfaatti sietää paremmin 100-prosenttisesti täyteen lataamista ja rasittuu vähemmän kuin muut Li-ion-akut kuormitettaessa korkealla jännitteellä pitkään. LFP-akun nimellisjännite on kuitenkin pienempi kuin kobolttiseoksilla, ja näin ollen sen ominaisenergia on pienempi. LFP-akkua voidaan käyttää korvaavana vaihtoehtona ajoneuvoissa lyijyakulle; neljä sarjaan kytkettyä kennoa tuottaa 12,8 V. Ongelmaksi muodostuu näiden akkujen kanssa liian pitkäaikainen korkea latausjännite ja huono suorituskyky (esimerkiksi käynnistyksessä) kylmissä olosuhteissa. [20]

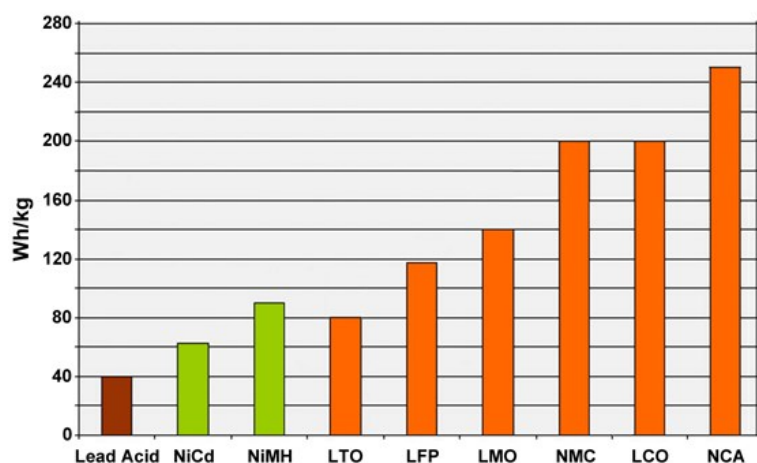
3.7.5 Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi

Akkutyypin litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi on ollut käytössä vuodesta 1999. Se on ominaisuuksiltaan hyvin samanlainen kuin NMC, sillä siinä on korkea ominaisenergia, kohtuullisen hyvä ominaisteho ja pitkä käyttöikä. Alumiini lisää akkutyypin vakautta. Huonona puolena voi mainita turvallisuus ja hinta. [20]

3.7.6 Litium-titaanioksidi (litium-titanaatti)

Litium-titanaattianodilla varustetut akut ovat olleet tunnettuja 1980-luvulta lähtien. Litium-titanaatti korvaa tavallisesti käytetyn grafiitin litiumioniakun anodissa ja muodostaa spinellirakenteen. Katodi voi olla litium-mangaanioksidi tai NMC. Litium-titanaattikennon nimellisjännite on 2,4 volttia, se voidaan ladata nopeasti, ja se pystyy tuottamaan kymmenen kertaa nimelliskapasiteettinsa suuruisen purkuvirran. Lataus- ja purkujaksojen lukumäärän sanotaan olevan enemmän

kuin tavallisen litiumionin. Litium-titanaatti on turvallinen, ja sillä on erinomaiset toimintaominaisuudet sekä korkeissa että alhaisissa lämpötiloissa. [20]



Kuva 9. Eri akkujen ominaisenergia [20]

3.8 Litiumioniakkujen tulevaisuus

Tällä hetkellä litiumioniakkujen maksimienergiatiheys on 250 Wh/kg. Seuraava askel kehityksessä on solid state battery (SSB) eli siirtyminen neste- ja geelimäisistä elektrolyyteistä kiinteäelektrolyyttiseen akkuun, jolla pyritään jopa energiatiheyteen 400–600 Wh/kg. Tällä hetkellä useampi eri yritys kehittää SSB-akkuja, ja osa on ilmoittanut tuotteen olevan jo lähes valmis markkinoille. Nestemäisen elektrolyytin ongelmana on sen mahdollisen vuodon aiheuttamat vaarat ympäristölle ja ihmiselle sekä huono lämpötilansieto ja palovaara. Kiinteän elektrolyytin akkuvalmistajat lupaavatkin parempaa suorituskykyä, vakaampaa ja lämmönsietokyvyltään parempaa akkutyyppeä, joka ei enää aiheuttaisi palovaaraa matkapuhelimissa tai sähköautoissa. Faraday-instituutti ennustaa vuoteen 2030 mennessä SSB-akkujen ottavan 7 %:n markkinaosuuden pienelektroniikan akuissa ja 4 % sähköautojen akuissa. [21]

Kiinteä elektrolyytti ei itsessään paranna suorituskykyä, mutta mahdollistaa vakaansa vuoksi sellaisten anodi materiaalien käytön, joita ei voisi käyttää nykyi-

sissä litiumioniakuissa. Yhtenä tämän hetken potentiaalisimpana ja energiatiheimpänä anodimateriaalina pidetään piitä (Si). Useat autonvalmistajat ovat sijoittaneet eri SSB-akkuja kehittäviin yrityksiin satoja miljoonia dollareita. [21]

Factorial energy -niminen yhtiö on julkistanut tähän mennessä suurimman SSB-akun, jonka testit osoittivat akun säilyttäneen 97,3 % kapasiteetistaan 675 latausjakson jälkeen. Yritys ei ole vielä paljastanut yksityiskohtia kehittämänsä elektrolyytin koostumuksesta. [21]

3.9 Sinkki-ilma-akku

Sinkki-ilma-akku on tehokas, ympäristöystävällinen, turvallinen ja samalla kustannustehokas. Se on houkutteleva vaihtoehto tulevaisuuden energianvarastointiin. Tähän saakka perinteinen sinkki-ilma-akku on ollut kemiallisesti epävakaa, mutta nyt uuden akkukemian myötä siitä on saatu entistä vakaampi. [22]

Akkua on kehittänyt Muensterin yliopiston MEET Battery Research Centerin tutkija tohtori Wei Sunin johtama kansainvälinen tutkimusryhmä. [22]

Wei Sunin mukaan innovatiivinen alkaliton elektrolyytti tuo sinkki-ilma-akkuun aiemmin tuntemattoman käänteisen sinkkiperoksidin (ZnO_2)O₂-kemian. Sinkki-ilma-akun uskotaan kilpailevan markkinoita hallitsevan litiumionin kanssa. Se tarjoaa vaihtoehtoisen akkuteknologian, jonka etuja ovat ympäristöystävällisyys, turvallisuus ja alhaiset kustannukset. Wei Sun korostaa, että tämä tekniikka vaatii vielä lisää intensiivistä tutkimista ja optimointia ennen markkinoille pääsyä. [22]

4 Sähkömoottorien kehitys

Voltan keksittyä akun (1800), Hans Christian Oerstedin havaittua sähkövirran synnyttämän magneettikentän (1820) ja William Sturgeonin kehitettyä sähkömagneetin (1825) oli perusta luotu sähkömoottorin kehittämiseksi. Siihen aikaan

ei vielä osattu päättää pitäisikö sähkömoottorin olla pyörivä vai edestakaisin liikkuva simuloiden höyrymoottorin männän liikettä. [23]

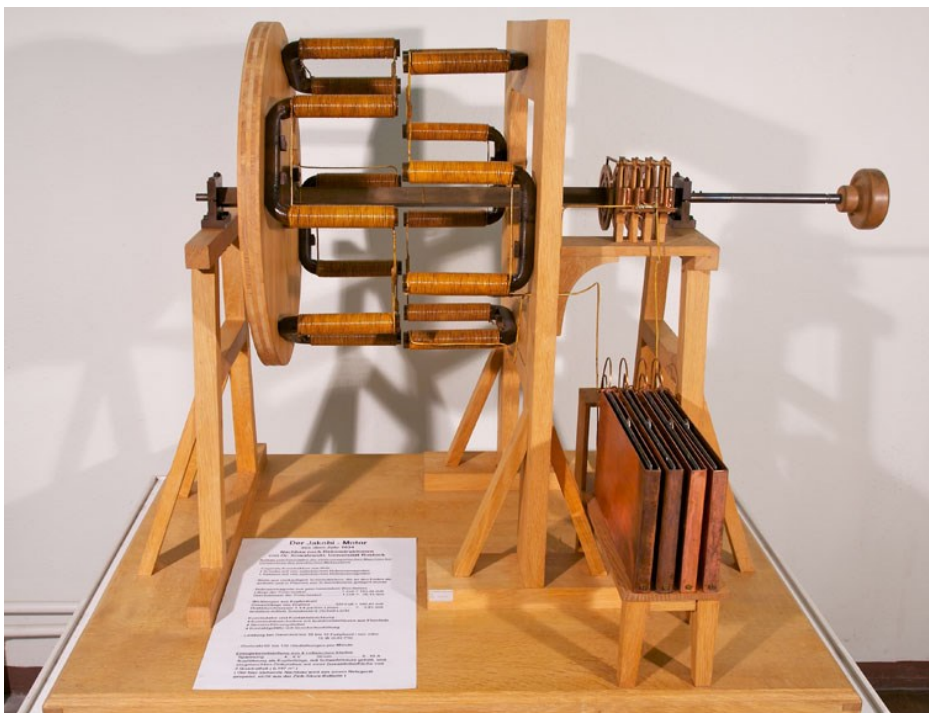
4.1 Sähkömoottorin toimintaperiaate

Sähkömoottorit luokitellaan tasavirtamoottoreihin ja vaihtovirtamoottoreihin. Niiden tärkeimmät osat ovat roottori ja staattori. Ne toimivat niin, että roottori, joka koostuu käämeistä, on yhdistetty kommutaattoriin. Harjojen, kommutaattorin koskettimien ja roottorin käämien geometria on sellainen, että kun virtaa käytetään, jännitteisen käämityksen (roottorin) ja staattorin magneettien polariteetit ovat väärässä asennossa ja roottori pyörii, kunnes se on melkein suoristettu staattorin kenttämagneeteilla. Kun roottori saavuttaa kohdistuksen, harjat siirtyvät seuraaville kommutaattorin koskettimille ja antavat virtaa seuraavaan käämiin. Pyöriminen kääntää virran suunnan roottorin käämityksen läpi, mikä saa roottorin magneettikentän kääntymään ja ajaa sitä pyörimään. [24]

4.2 Ensimmäinen sähkömoottori

Toukokuussa 1834 Moritz Jacobi onnistui rakentamaan ensimmäisen varteenotettavan pyörivän sähkömoottorin, joka tuotti huomattavan tehon (n. 15 W) ja oli maailman tehokkain sähkömoottori (kuva 10). Nelisen vuotta myöhemmin hän kehitti seuraavan moottorin, joka oli teholtaan noin 300 W, sen avulla kuljettiin 14 ihmistä veneellä jokea pitkin. Vene oli kahdeksan metriä pitkä, sinkkiakkuja oli 320 paria (paino 200 kg), ja se kulki 2,5 km/h yli 7,5 kilometrin matkan. Jacobi ajeli veneellään päiväkausia Neva-joella, ja senaikaisten sanomalehtien mukaan kuluneen sinkin hinnaksi tuli 24 puntaa kahden kolmen kuukauden ajelusta. [23]

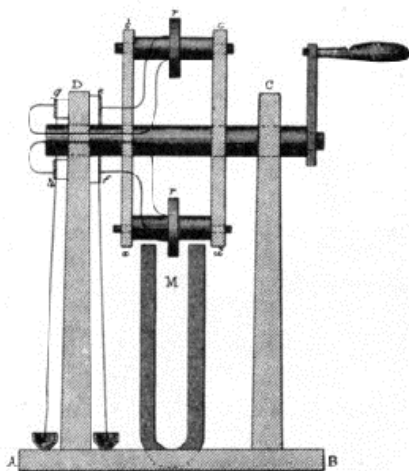
Vielä vuonna 1839 hän onnistui saamaan moottoristaan tehoa noin yhden kilowatin verran, ja hänen veneensä kulki 4 km/h. Avain tekijä oli hänen valmistama sinkki-platina-akku. [23]



Kuva 10. Moritz Jacobin sähkömoottori [25]

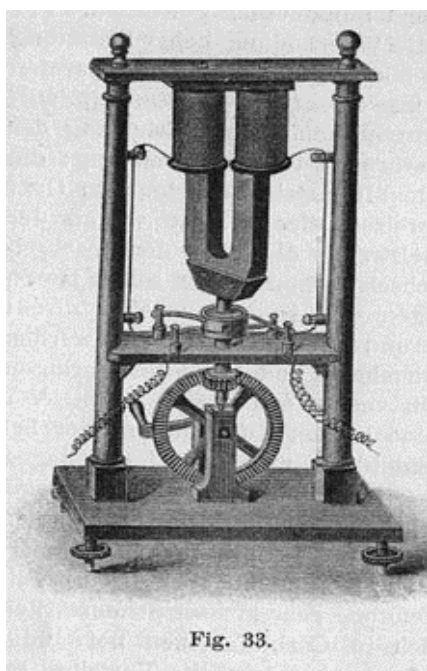
4.3 DC-moottorit

Jacobin ja useiden muiden keksijöiden onnistuneista sähkömoottoreista huolimatta tämä ei ole se moottorityyppi, jota olemme tänä päivänä tottuneet käyttämään. Vuonna 1833 saksalainen Heinrich Friedrich Emil Lenz julkaisi artikkelin sähkögeneraattorin ja sähkömoottorin käänteisyydestä. Vuonna 1838 hän julkaisi yksityiskohtaisen kuvauksen kokeistaan Pixii-generaattorilla (kuva 11), jota hän käytti moottorina. Jacobin keksimän sähkömoottorin sijaan moottoreita alettiin kehittää generattoreista. [23]

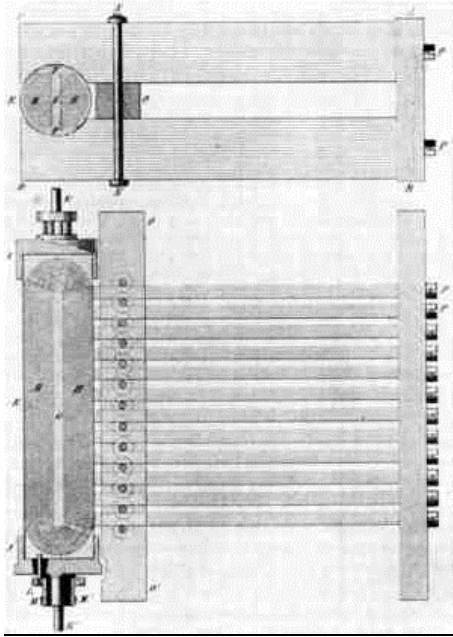


Kuva 11. Pixii-generaattori [23]

Perustuksen kehitykselle loivat William Ritchie ja Hippolyte Pixii vuonna 1832 keksimällä kommutaattorin (kuva 12), Werner Siemens keksimällä kaksois-T-ankkurikäämin (kuva 13) vuonna 1856 sekä Werner Siemensin päänsinöörinäkin toiminut Friedrich Hefner-Alteneck keksimällä rumpukäämityksen (kuva 14) vuonna 1872. Tasavirtamoottoreita käytetään tänä päivänäkin paljon pienitehoisiin (alle 1000 W) käyttötarkoituksiin. [23]



Kuva 12. Ensimmäinen kommutattori [23]



Kuva 13. Ankkurikäämi [23]



Kuva 14. Rumpukäämi [23]

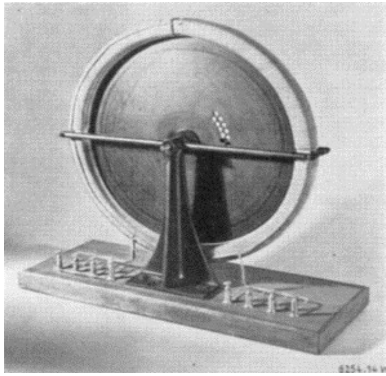
4.4 Kolmivaihemoottori

Kolmivaiheinen sähköjärjestelmä syntyi vuosina 1885–1889. Ketään yksittäistä henkilöä ei voi järjestelmän keksijäksi nimetä, vaan asian kehittämisen parissa

työskenteli useita enemmän ja vähemmän tunnettuja henkilöitä. Kolmivaihejärjestelmä on perusta muun muassa nykyaikaisille kehittyneille sähkömoottoreille, joita esimerkiksi sähköautoissakin käytetään. [23]

Opiskellessaan Itävallassa Grazissa vuonna 1882 Nikola Tesla mietti jo monivaiheista sähköjärjestelmää. Hän muutti Amerikkaan vuonna 1884 ja perusti New Yorkiin pienen kehityslaboratorion vuonna 1886. [23]

Italialainen professori Galileo Ferraris rakensi onnistuneesti ensimmäisen pienen kaksivaiheisen induktiomootorin (kuva 15) vuonna 1885. Hän kuitenkin uskoi virheellisesti, ettei tämänkaltaisten moottoreiden hyötysuhde voi koskaan ylittää 50 %:a, ja hän menetti mielenkiintonsa koneidensa kehittämiseen. [23]



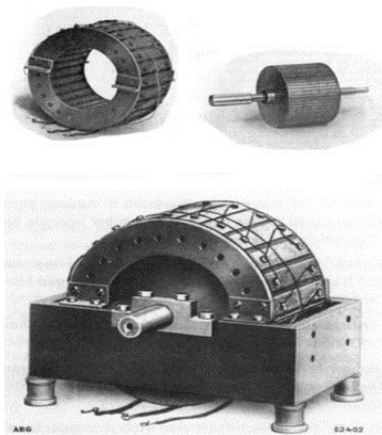
Kuva 15. Induktio-moottori [23]

Heinäkuussa 1887 saksalainen Friedrich August Haselwander sai ensimmäisenä ajatuksen kolmivaiheisen sähköjärjestelmän käyttämisestä. Hän rakensi ensimmäisenä kolmivaiheisen synkronoidun generaattorin ulkonevilla navoilla (kuva 16). Saksan postiviranomaiset kuitenkin kielsivät generaattorin käytön siinä pelossa, että se aiheuttaisi häiriötä sähkösanomaverkoissa [23]



Kuva 16. Kolmivaihegeneraattori [23]

Venäläinen Michael Dolivo-Dobrowolsky, AEG:n johtava sähköasiantuntija, koki yhteen Teslan ja Ferrarisin perusideoita ja kehitti niitä vielä huomattavasti. Hän keksi kolmivaiheisen häkki-induktiomoottorin vuonna 1889 (kuva 17), joka on tänäkin päivänä laajasti käytössä. [23]

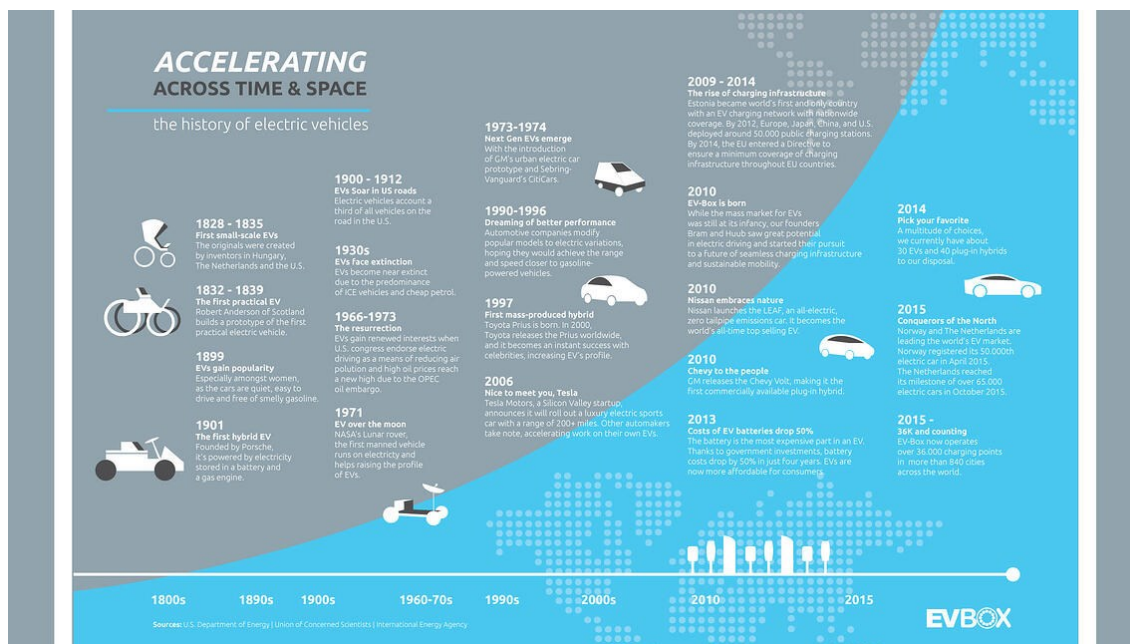


Kuva 17. Kolmivaiheinduktiomoottori [23]

5 Sähköauto

Sähköautot voivat nykyisin näyttää trendikkäiltä ja moderneilta, mutta kyseessä ei ole meidän aikakautemme keksintö. Sähköauton historia ulottuu yli 200 vuoden taakse. On vaikea tarkkaan määrittää, mistä sähköauton historia alkaa,

kuka valmisti ensimmäisen sähköauton ja koska sähköauto keksittiin, mutta alusta saakka haaveilijat ovat yrittäneet saada niitä toimimaan liikenteessä. Nykyajan sähköautot ovat tulosta useista teknisistä läpimurroista akuista sähkömoottoreihin. Siksi ei ole yksittäistä keksijää tai yksittäistä maata, jolle kunnia kuuluisi. [26; 28]



Kuva 18. Sähköautojen kehitys [27]

5.1 Ensimmäiset sähköautot (1830–1880)

Sähköauton historia sai alkunsa jo ennen polttomoottoria. Sähköliikenteen kehitys käynnistyi 1800-luvun alussa, jolloin useat tutkijat Euroopassa alkoivat kehittää akkuja ja moottoreita. Arviolta vuonna 1830 skotlantilainen keksijä Robert Anderson esitteli sähkövaunun, jota usein pidetään ensimmäisenä sähköautona. Samoihin aikoihin unkarilainen tiedemies Ányos Jedlik ja hollantilainen professori Sibrandus Stratingh keksivät mallikappaleen sähköautosta ja amerikkalainen keksijä Thomas Davenport esitteli sähköisen pienoismallin. [26; 27]

Nämä kaikki olivat kuitenkin vain sähköistettyjen kärrien prototyyppejä, joiden huippunopeus oli vain 12 Km/h, ohjaaminen oli vaivalloista ja toimintasäde oli hyvin pieni. [26; 27]

Vuonna 1837 Robert Davidson Aberdeenista Skotlannista rakensi sähköveturin prototyypin. Suuremman ja paremman version hän esitteli vuonna 1841. Se pystyi kulkemaan samalla akulla 6,5 km/h yli kahden kilometrin matkan vetäen kuusi tonnia kuormaa. Tämä vaikuttava esitys sai rautatietyöläiset huolestumaan. He pitivät Davidsonin sähköveturia uhkana heidän työlleen höyrykoneiden parissa ja tuhosivat ”paholaisen koneen”. [28]

1860-luvulla Gaston Plantén keksimä ensimmäinen ladattava lyijyakku mahdollisti valtavan läpimurron sähköisessä liikkumisessa. Vuonna 1884 keksijä Thomas Parker auttoi sähköautojen prototyyppien rakentamisessa ja sähköisien raitiovaunujen käyttöönotossa Englannissa. Kuitenkin vasta 1880-luvun lopulla kemisti William Morrison Iowaa yhdisti ladattavan akun ja sähkömoottorin ja rakensi USA:n ensimmäisen käytännöllisen sähköauton. Morrisonin ajoneuvo oli perinteinen hevosvaunu, jota oli muunneltu niin, että akut mahtuivat kyytiin. Morrisonin sähkövaunuun mahtui korkeintaan 12 ihmistä, ja sen huippunopeus oli 32 km/h, se oli etuvetoinen, ja tehoa oli neljä hevosvoimaa. Vaunussa oli 24 akkukennoa, jotka piti ladata 80 kilometrin välein. Morrison itse oli enemmän kiinnostunut akkujen kehityksestä kuin sähköisestä liikkuvuudesta, mutta hän oli herättänyt muiden keksijöiden mielenkiinnon sähköiseen autoiluun. [27; 28]

5.2 Sähköautot liikenteessä (1890–1914)

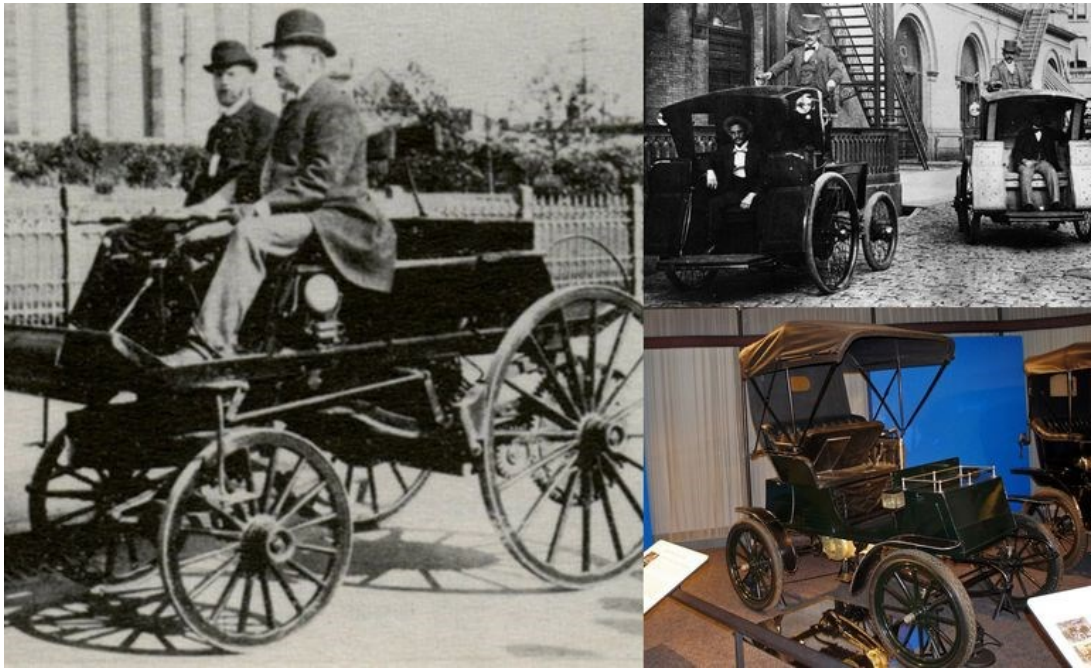
1900-luvun vaihteessa monet ihmiset vaihtoivat hevosensa ja hevoskärryensä moottoriajoneuvoon. Tämän seurauksena autojen suosio kasvoi ja taistelu liikumistavan tulevaisuudesta alkoi. Käyttövoimavaihtoehtoina olivat höyry, bensiini ja sähkö. Tuolloin Amerikan teillä oli melko tasainen jako näiden kolmen käyttövoiman välillä: noin 40 prosenttia ajoneuvoista oli höyrykäyttöisiä, 38 prosenttia oli sähkökäyttöisiä ja 22 prosenttia oli bensiinikäyttöisiä. [27]

Höyryajoneuvojen suosio oli kasvanut 1870-luvulta lähtien, ja niillä oli pieni enemmistö Yhdysvaltojen markkinoista vuosisadan vaihteessa, mutta niissä oli paljon huonojakin puolia, jotka johtivat lopulta höyryajoneuvojen häviämiseen katukuvasta. Höyryajoneuvot vaativat jopa 45 minuutin käynnistysaikoja, ja niitä

piti jatkuvasti täyttää vedellä, mikä tietysti rajoitti niiden kantamaa. Vaikka höyry oli tehtaiden ja junien luotettava voimanlähde, se ei lopulta osoittautunut kovin käytännölliseksi sen ajan henkilöautoissa. [27]

Samoihin aikoihin, kun William Morrison työskenteli sähkökäyttöisen vaununsa parissa, Gottlieb Daimler ja Carl Benz kehittivät samanaikaisesti maailman ensimmäiset bensiinikäyttöiset autot Saksassa vuonna 1886. Bensiinikäyttöiset autot vaativat kuitenkin kuljettajaa vaihtamaan vaihteita ja käynnistämään moottorin raskaalla käsikammella. Ne olivat myös paljon meluisampia kuin höyry- tai sähköautot ja päästivät enemmän saasteita ilmaan. Verrattuna kahteen kilpailijaansa sähköautot osoittautuivat kilpailukykyiseksi vaihtoehdoksi. Niistä ei pääsyt epämiellyttäviä hajuja eikä ääniä, eikä niiden käynnistykseen kulunut pitkiä aikoja kuten höyrymoottorissa. [27]

Useissa lähteissä (kuva 19 vasen) ensimmäisenä todellisena sähköautona mainitaan Electrobat. Sen kehittivät philadelphialaiset Pedro Salom ja Henry G. Morris, ja se oli ensimmäinen kaupallinen sähköajoneuvo. Aluksi Electrobat oli erittäin painava ja hidas; siinä nimittäin oli teräsvaunu, teräsrenkaat ja 1600 kiloa akkuja. Sitä kuitenkin kehiteltiin muun muassa ilmarenkailla ja kevyemmällä rakenteilla niin, että vuoteen 1896 mennessä sen takapyöristä ohjattava vaunu käytti kahta 1,1 kW:n moottoria ja se kulki 40 km huippunopeudella yli 30 km/h. Electrobat voitti viiden mailin sprinttikilpailun bensiinikäyttöisiä duryea-autoja vastaan vuonna 1896. [28]

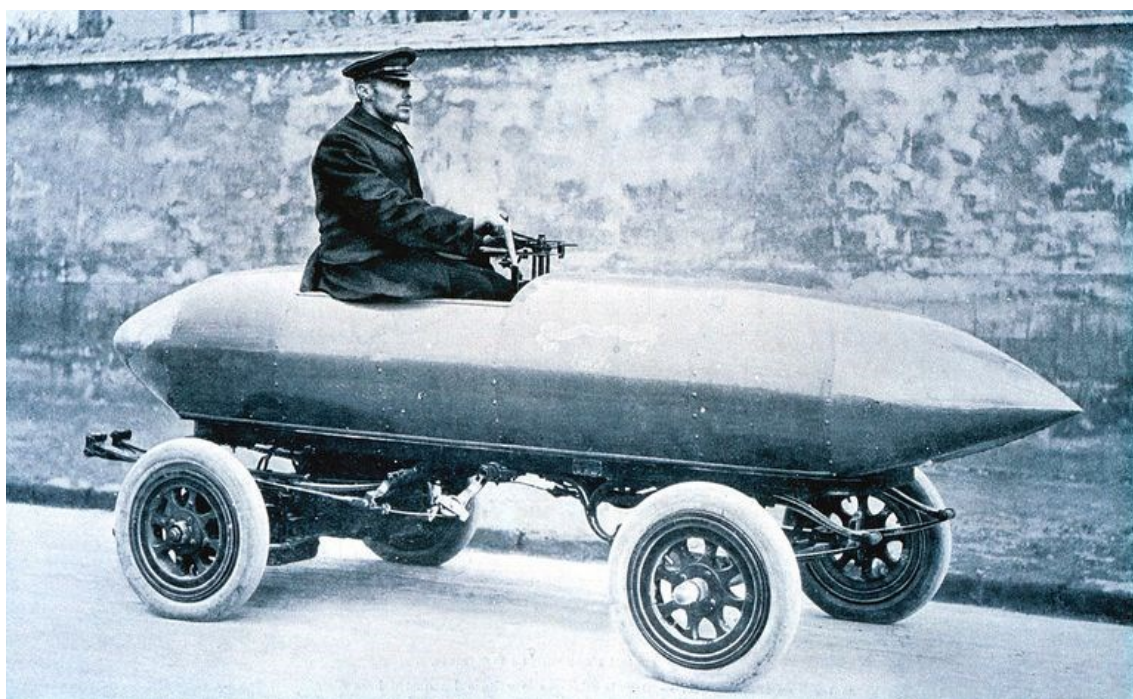


Kuva 19. Electrobat ja Columbia [28]

Rakennettuaan muutamia "Hansom"-versioita Electrobatista (kuva 19 oikea ylä) kilpaillakseen New Yorkin taksiliikenteessä hevosvetoisia takseja vastaan, Salom ja Morris myivät ideansa Isaac L. Ricelle, joka perusti Electric Vehicle Companyn (EVC). Hän puolestaan houkutteli suuria sijoittajia ja osakkaita, ja 1900-luvun alussa heillä operoi jo yli 600 sähkötakssia pelkästään New Yorkissa ja lisäksi pienempiä määriä Bostonissa, Baltimoressa ja muissa itäisissä kaupungeissa. New Yorkissa akkujen lataamiseen kuluva autojen seisonta-aikaa saatiin lyhennettyä sillä, että luisteluareena muutettiin akunvaihtoasemaksi, jonne sähkövaunu ajoi sisään ja vaihtoi loppuun käytetyn akun täyteen ladattuun. Monien start-up-yritysten tavoin EVC laajeni liian nopeasti, joutui vaikeuksiin sijoittajien ja kumppaneiden kanssa, ja koko taksiyritys oli kaatunut vuoteen 1907 mennessä. [28]

EVC:n akkutoimittajasta, joka oli myös sijoittaja ja osakas, tuli nykyinen Exide. Sen valmistuskumppani Pope, bensiiniautojen edelläkävijä, otti teknologian käyttöönsä ja kehitti sähkövaunun nimeltä Columbia (kuva 19 oikea ala). Columbia saavutti tuhannen valmistetun yksikön virstanpylvään paljon ennen kuin Detroitin visionääriset massavalmistajat, Ransom Olds ja Henry Ford pääsivät vauhtiin. [28]

Sähköajoneuvot osoittivat voimansa myös varhaisessa moottoriurheilussa. Belgialainen Camille Jenatzy rakensi sähköautoja Pariisin lähellä ja teki useita huippunopeuskokeita esitelläkseen yrityksensä insinööritaitoja. Kohokohta tuli keväällä 1899 hänen ajaessaan kilpa-autollaan La Jamais Contente (”ei koskaan tyytyväinen”) ensimmäisenä yli 100 km/h. Auto oli torpedon muotoinen (kuva 20), ja se oli valmistettu kevyestä alumiiniseoksesta. Siinä oli kaksi 25 kilowatin sähkömoottoria, jotka toimivat 200 voltin jännitteellä. [28]



Kuva 20. La Jamais Contente [28]

1800-luvun lopussa ja 1900-luvun alussa autoteollisuudessa syntyi uusia keksintöjä kuin sieniä sateella ympäri maailmaa. Ransom Olds rakensi lyhyen aikaa sähköisiä hevoscärryjä ennen kuin kehitti ensimmäisen massamarkkinoiden Oldsmobile-auton. [28]

Yksi Oldsin sähköautoista (kuva 21 oikea ala), joka selvisi Detroitin tehtaan tulipalosta, on sijoitettu museoon Lansingiin Michiganiin. Toinen kertaluontoinen museoesine on Egger-Lohner C.2 Phaeton (kuva 21 oikea ylä), jonka suunnitteli 23-vuotias Ferdinand Porsche (hänen poikansa perusti myöhemmin nykyisen Porsche-yrityksen toisen maailmansodan jälkeen). Kyseisen sähkövaunun sähköjärjestelmä painoi 130 kg sekä pystyi tuottamaan viiden hevosvoiman tehon

ja kiihdyttämään vaunun 35 km/h -nopeuteen. Teknisesti se ei ollut kummoisen näköinen, mutta se voitti 25 mailin sähköajoneuvojen kilpailun Berliinissä syyskuussa 1899. [28]

Sähköautoista tulikin nopeasti suosittuja kaupunkilaisten keskuudessa, kun sähköä oli helposti saatavilla. Mitä enemmän sähköverkko laajeni ja useammat ihmiset saivat sähköä, sitä suosittumia sähköautoista tuli. Tämä suosio kiinnitti monien sen ajan pioneerien huomion. Porsche kehitti maailman ensimmäisen hybridauton, ja Thomas Edison teki yhteistyötä ystävänsä Henry Fordin kanssa edullisen sähköauton rakentamiseksi. Kuvassa 21 vasemmalla Thomas Edison ja Henry Ford istuvat Edisonin omassa Studebaker-sähkövaunussa. Studebaker oli tunnettu hevოსvaunujen valmistaja 1800-luvulla ja alkoi valmistaa sähkövaunuja 1900-luvulla. [27; 28]



Kuva 21. 1800-luvun sähkövaunuja [28]

5.3 Polttomoottori syrjäyttää sähkömoottorin (1914–1970)

Sähköautojen synkin aikakausi alkoi, kun massatuotettu polttomoottoriajoneuvo esiteltiin. Fordin Model T:n myötä bensiinikäyttöiset autot tulivat laajasti saataville ja maksoivat vain kolmanneksen sähköauton hinnasta. Ensimmäinen Model T maksoi 850 dollaria vuonna 1908 ja alle 300 dollaria vuonna 1923. Kun kuvan 22 Detroit Electric vuodelta 1923 rakennettiin, näytti sähköautojen tulevaisuus jo aika heikolta. Kuitenkin kaupungissa rikkaiden joukossa sähköautot olivat vielä suosiossa. Usein kuljettajat olivat ihmisiä, jotka arvostivat hiljaisuutta, saasteettomuutta ja sitä, ettei sähköautoa tarvinnut käynnistää kamella. [27; 28]

1910-luvun puolivälissä Detroit Electricin akkupäivityspaketti (Edisonin nikkeli-rauta-akuilla) maksoi jo yksinään 600 dollaria. Tämä ei haitannut varakkaita ihmisiä, kuten Clara Fordia (Henry Fordin vaimoa), joka piti miehensä tuotetta liikaisena ja meluisana ja ajoi sen sijaan Detroit Electricillä vuosina 1908–1914. Sen jälkeen kun Teksasista löydettiin öljyä, bensiinistä tuli halpaa ja se oli monien saatavilla, kun taas sähköä oli saatavilla vain kaupungeissa. [27; 28]

Seuraavien vuosien aikana sähköautot kehittyivät vain vähän, ja 1930-luvun puoliväliin mennessä ne olivat lähes kokonaan kadonneet markkinoilta [27; 28].

Bensiini oli halpaa, sitä oli runsaasti, ja polttomoottorit kehittyivät hurjaa vauhtia. Ironista on se, että juuri yksi tietty sähkömoottori iski viimeisen naulan sähköautojen arkun kanteen. Kun Charles Kettering Dayton Engineeringistä keksi sähköisen käynnistimen eikä moottoria tarvinnut enää käynnistää käsin kampeamalla, oli polttomoottoriautojen suvereenius taattu, ja sähköautot olivatkin seuraavat puoli vuosisataa lähes unohduksissa. Pieni valonpilkahdus kävi ensimmäisen maailmansodan aikaan, kun bensiinin hinta nousi ja sen saatavuus oli toisinaan heikkoa, mutta kiinnostus hiipui sodan mukana. [26; 27; 28]



Kuva 22. Detroit Electric [28]

Ennen toista maailmansotaa useimmat sähköautojen valmistajat olivat joko siirtyneet valmistamaan polttomoottoreita tai lopettaneet toimintansa. Sähköautoilla oli kuitenkin vahvuutensa etenkin suurissa kaupungeissa ja hitaissa taajamissa. Sodan jälkeen Japanissa bensiiniä oli vähän, se oli kallista ja hallitus kannusti sähköautojen kehittämiseen. Kuvassa 23 on vuoden 1947 Tama (Tama-yhtiöstä tuli Prince, josta tuli Datsun/Nissan). Tällä Tamalla pääsi reilut 30 km/h noin 65 km:n matkan lyijyakuilla, ja se toimi taksina. [28]



Kuva 23. Japanilainen sähköauto Tama [28]

Vanhosten autojen asiantuntijat sanoisivat varmasti, että kuvassa 24 on Renault Dauphine, mutta se onkin Henney Kilowatt. Henneyn korit rakennettiin Renault'ltä ostetuilla koneilla ja työkaluilla, joten ne eivät olleet niinkään muunneltuja ranskalaisia autoja vaan pikemmin lähes identtisiä Yhdysvalloissa valmistettuja autoja. Ensimmäisessä, vuoden 1959 kilowatissa oli 36 voltin järjestelmä ja sillä pääsi 65 kilometriä jopa yli 60 km/h -nopeudella. Vuonna 1960 autoon päivitettiin 72 voltin järjestelmä, jolla pääsi jo lähes 100 km/h yli 90 kilometrin matkan. Henneyllä ei ollut kuitenkaan kovin hyvä jälleenmyyjäjärjestelmä. Sadasta valmistetusta autosta myytiin 47. Henney Kilowatin hinta oli tuolloin 3600 dollaria, kun Renault Dauphinea myytiin hintaan 1645 dollaria. [28]

Myös General Motors jatkoi sähköautojen kehittämistä, ja vuonna 1966 valmistui Corvairin koriin rakennettu Electrovaair. Siinä olevat hopea-sinkkiakut muodostivat 532 voltin jännitteen 115 hevosvoiman vaihtovirtamoottorin pyörittämiseen. Tämä edellä mainittu yhdistelmä oli yhtä tehokas kuin Corvairin kuusisylinterinen bensiinimoottori. Electrovaairin huippunopeus oli 130 km/h, ja yhdellä latauksella pääsi 65–130 km. Suurimman ongelman muodosti se, että akut kestivät vain sata lataussykliä ja uusi akkupaketti maksoi 160 000 dollaria.

Electrovairia valmistettiin vain yksi kappale, ja se on edelleen General Motorsilla. [28]



Kuva 24. Henney Kilowatt [28]

Vuonna 1967 General Electric valmisti kokeellisen sähköauton, GE Deltan (kuva 25). Se oli järkyttävän ruma ja kulki 65 km:n matkan lähes 100 km/h -nopeudella käyttämällä nikkeli-rauta-akkuja. Samana vuonna Ford esitteli myös kokeellisen sähköauton, joka käytti vielä kalliimpia nikkeli-kadmiumakkuja, muttei silti pystynyt parempaan. Kaikki olivat yhtä mieltä siitä, että akkuteknologian pitäisi kehittyä vielä paljon. [28]



Kuva 25. GE Delta [28]

5.4 Sähköajoneuvojen paluu (1970–2003)

1970-luvulla kun öljyn hinta ja bensiinipula saavuttivat huippunsa (tynnyrihinta nelinkertaistui yhdessä yössä) arabien öljysaarron myötä, kasvoi kiinnostus vähentää yhteiskunnan riippuvuutta öljystä. Autonvalmistajat alkoivat tutkia vaihtoehtoisia polttoainetta käyttävää ajoneuvoa mukaan lukien sähköautot. Esimerkiksi General Motors kehitti prototyypin kaupunkiajoneuville, ja jopa NASA auttoi nostamaan sähköauton profiilia, kun sen sähköisestä Lunar-mönkijästä tuli ensimmäinen miehitetty ajoneuvo kuussa. Sähköajoneuvoissa oli kuitenkin edelleen useita huonoja puolia verrattuna bensiinikäyttöisiin ajoneuvoihin, muun muassa lyhyempi kantama ja hitaat huippunopeudet. Tämän vuoksi kuluttajat eivät olleet kovin kiinnostuneita sähköajoneuvoista. [27; 28]

Yleisön kiinnostuksen puute ei kuitenkaan lannistanut tutkijoita ja insinöörejä. Seuraavien 20 vuoden aikana autoteollisuusyritykset muuntelivat suosituista malleistaan sähköisiä muunnelmia saavuttaakseen bensiinikäyttöisten ajoneuvojen kantamaa ja huippunopeutta. Yksi merkittävimmistä käännekohdista oli Toyota Priuksen esittely. Japanissa vuonna 1997 julkaistusta Priuksesta tuli maailman ensimmäinen massatuotettu sähkö-hybridiauto. Vuonna 2000 Prius julkaistiin maailmanlaajuisesti ja siitä tuli valtava menestys. Tämän jälkeen jatkuva bensiinin hinnan nousu ja kasvava huoli hiilidioksidipäästöistä ovat tehneet Priuksesta maailmanlaajuisesti myydyimmän hybridin. [27]

Ennen Priusta oli kuitenkin useita hyviä yrityksiä, muun muassa GE Delta alkoi kiinnostaa ihmisiä, ja vaikka yritys vaihtoi omistajaa ja autoa hieman muunneltiin vuosien saatossa, valmistettiin niitä yli 6500 kappaletta. [28]

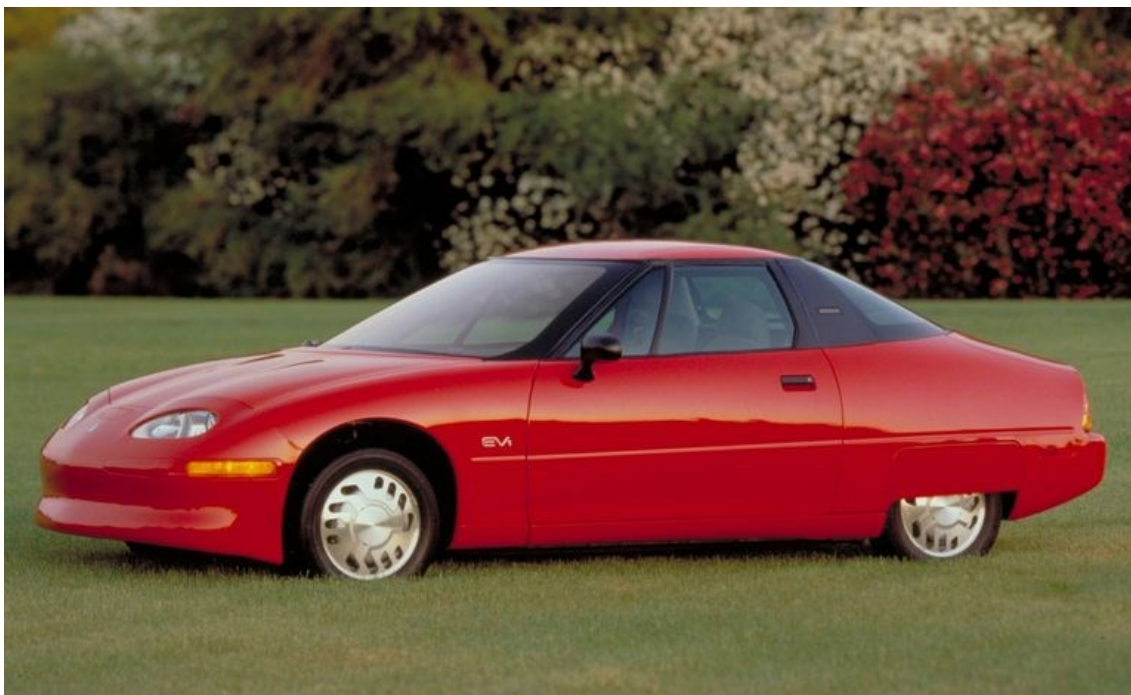
Vuonna 1977 GM päätti kokeilla, miten Chevrolet Chevette toimisi sähköautona. Sen takaistuimien tilalle laitettiin akusto lyijyakuista, ja sen nimeksi tuli Electrovette. Noin 50 km/h - nopeudella sillä pääsi 80 km:n matkan, mutta uuden akuston, jonka piti olla nikkeli-sinkkiakusto, oli tarkoitus kaksinkertaistaa kantama. Jotkut General Motorsin ekonomistit ennustivat rajua bensiinin hinnan nousua ja Electrovettea kehitettiin kolmen vuoden ajan, mutta kun bensiinin hinnat eivät lähteneetkään rajuun nousuun sinä aikana, kehitys lopetettiin. [28]

1990-luvun puolivälissä GM rakensi EV1-nimisen sähköauton (kuva 26). Siinä oli sen ajan huipputekniikka lukuun ottamatta akustoa, joka koostui lyijyakuista. GM oli käyttänyt niin paljon rahaa auton muihin osa-alueisiin, että auton hinta olisi karannut kalliimmalla akulla. EV1:ssä käytettiin paljon alumiini- ja magneesiumosia. Siinä oli induktiivinen latausjärjestelmä ja erittäin kehittynyt elektroniikka, joka muun muassa muutti akun tasajännitteen moottorille vaihtovirraksi, ja jarrutustilanteessa moottorilta saadun vaihtovirran akulle sopivaksi tasavirraksi. EV1 oli pieni kaksipaikkainen auto, joita vuokrattiin leasingsopimuksella noin 800 kappaletta, eikä niitä koskaan suostuttu myymään vaan sopimuksen päätyttyä ne romutettiin lähes kaikki. [28]

Vuonna 1992 Alan Cocconi perusti AC Propulsionin, joka vastasi EV1:n koko elektroniikkapuolesta. Viisi vuotta myöhemmin AC Propulsion esitteli Tzeron (kuva 27), jossa oli lyijyakut ja 150 kW tehoa. Kori ja alusta olivat Piontek Sportech -lasikuituautosta. [28]

Litiumioniakut tekivät tuloaan juuri tuolloin, ja tuleva Tesla Motorsin perustaja Martin Eberhard ehdotti, että lyijyakut pitäisi korvata niillä. Kevyempänä ja energiatheämpänä akkuna litiumioniakku laukaisi Tzeron nollasta sataan kilometriin tunnissa vain 3,7 sekunnissa. Litiumioniakuilla Tzeron hinnaksi olisi tullut 220 000 dollaria, ja kun Cocconi kumppaneineen vastusti auton ottamista tuotantoon, Eberhard ja Marc Tarpenning Perustivat Tesla Motorsin vuonna 2003. He lainasivat Tzeron litiumioniversiota esitelläkseen ideaansa sijoittajille. [28]

Eräs potentiaalinen sijoittaja, Elon Musk, yritti myös ensin saada AC Propulsionin ryhtymään Tzeron tuotantoon, mutta kun se ei onnistunut, hän sijoitti rahansa Tesla Motorsiin. [28]



Kuva 26. General Motorsin EV1-sähköauto [28]



Kuva 27. AC Propulsionin Tzero [28]

5.5 Sähköautojen vallankumous (2003–2020)

Eberhardin ja Tarpenningin nähtyä litiumioniakkujen kapasiteetin kasvun edellisessä hankkeessaan ja perustettuaan Tesla Motorsin, Piilaakson start-up-yritys ilmoitti aloittavansa ylellisen sähköurheiluauton tuotannon vuonna 2006, auton, joka kulki yli 320 kilometriä yhdellä latauksella. Vuonna 2008 Tesla aloitti Roadsterin tuotannon, joka oli käytännössä AC Propulsionin Tzeron tekniikka kiinnitettynä Lotus Eliseä muistuttavaan koriin. Seuraaviin vuosimalleihin Roadster sai Teslan omaa tekniikkaa. Tesla Roadster oli ensimmäinen tuotantoauto, joka käytti litiumioniakkuja, ja ensimmäinen sähköauto, jolla pääsi yhdellä latauksella 320 kilometriä. Tesla myi Roadstereita neljän vuoden aikana yli 2400 kappaletta huolimatta 109 000 dollarin hinnasta. [27; 28]

Teslan menestys kannusti myös monia suuria autonvalmistajia nopeampaan työskentelyyn omien sähköautojensa parissa. Nissan lisäsi kilpailua lanseeraamalla Nissan LEAFin vuonna 2010. Tästä täyssähköisestä, päästöttömästä autosta tuli myöhemmin maailman kaikkien aikojen myydyin sähköauto. Sen kokonaismyynti ylitti 300 000 kappaletta, vaikka yhdellä latauksella pääsikin vain noin 160 kilometriä. [27; 28]

Vuonna 2017 Chevrolet toi myyntiin Boltin. Bolt oli lopputulos General Motorsin hyödyntämästä kokemuksesta EV1:stä ja plug-in-hybridi Voltista. Siinä oli nestejäähdytteinen 60 kWh:n akku, latauksella pääsi yli 350 kilometriä, ja se kiihtyi 0–100 km/h vain 6,5 sekunnissa. [28]

Näinä vuosina markkinoille tuli uutta akkutekniikkaa, jolla sähköautojen kantama piteni ja samalla hinta aleni. Litiumioniakkujen hinta on laskenut 97 % vuodesta 1991, ja tämän vuoksi sähköautojen kokonaiskustannukset ovat laskeutuneet ja niistä on tullut edullisempia kuluttajille. Akkuteknologian kehittyttyä ja hinnan laskun jälkeen lähes jokainen autovalmistaja on alkanut kehittää omaa sähköautoa ja monet valmistajat ovat jopa väittäneet lopettavansa polttomoottorin valmistamisen kokonaan. [27]

5.6 Käännekohta (2020 eteenpäin)

Sähköisen liikenteen ja erityisesti sähköisten henkilöautojen lisääntyminen liikenteessä on ollut voimakasta. Millä tahansa mittarilla mitataankin, on kiistatonta, että kuluttajat näkevät sähköisen liikkuvuuden toimivan ja olevan suuressa roolissa tulevaisuudessa. Vuoden 2010 vähäisestä määrästä sähköautojen määrä liikenteessä on kasvanut noin miljoonaan vuonna 2016, ja vuoden 2020 loppuun mennessä maailman teillä oli jopa kymmenen miljoonaa sähköautoa. Huolimatta pandemian aiheuttamasta maailmanlaajuisesta automyyntin laskusta sähköautojen rekisteröinnit lisääntyivät 41 prosenttia vuonna 2020 ja nousivat 4,6 prosenttiin kaikesta automyyntistä maailmanlaajuisesti. Tämä kasvu ei myöskään rajoitu vain muutamaan maahan. Kaikkialla maailmassa sähköisten ajoneuvojen myynti on kasvanut jatkuvasti tärkeimmillä markkinoilla, mutta missään kasvu ei ole ollut yhtä nopeaa kuin Euroopassa. [27]

Norja on jo lähes kokonaan lopettanut ICE (Internal combustion engine) -ajoneuvojen myyntin, ja Norjassa on suurin sähköautojen levinneisyys: lähes 80 prosenttia syyskuussa 2021 myydyistä uusista autoista oli täyssähköisiä. Norjan ennustetaan olevan ensimmäinen maa, joka lopettaa kokonaan ICE-autojen myyntin. [27]

Vaikka Norja olisi ensimmäinen maa, joka myy pelkästään sähköautoja, ei se varmasti jää ainoaksi. Kaikkien suurimpien autonvalmistajien odotetaan siirtyvän täysin sähköisiksi vuoteen 2035 mennessä. McKinsey & Companyn mukaan tämä sähköisen liikkuvuuden nopea kasvu tarkoittaa, että olemme jo saavuttaneet käännekohdan, jonka jälkeen sähköajoneuvojen myynti ylittää perinteisten polttoainekäyttöisten ajoneuvojen myyntin 2020-luvun loppuun mennessä. Kun hallitukset, yritykset ja yksityishenkilöt katsovat kohti kestävää tulevaisuutta, monet luottavat sähköautoihin ajatellessaan hiilidioksidipäästöjen vähentämistä. [27]

5.7 Sähköisen autoilun tulevaisuus

Vaikka sähköautojen määrän kasvu miljoonasta kymmeneen miljoonaan autoon liikenteessä on tapahtunut nopeasti, niin seuraava askel voi olla vielä paljon suurempi. Kansainvälinen energiajärjestö IEA ennustaa, että tämän vuosikymmenen loppuun mennessä maailman teillä voi olla jopa 145 miljoonaa sähköllä kulkevaa ajoneuvoa. [27]

Vaikuttavan tästä luvusta tekee myös se, että se on IEA:n varovainen arvio. Tämä skenaario, joka on osa organisaation urauurtavaa raporttia maailmanlaajuisesta sähköisen liikkuvuuden leviämisestä, koostuu vain ilmoitetuista poliittisista tavoitteista, joita hallitukset ovat säätäneet ja ilmoittaneet eri puolilla maailmaa. Sellaisessa tapauksessa, jossa saavuttaisimme Pariisin sopimuksen mukaiset maailmanlaajuiset ilmastotavoitteet, vuonna 2030 sähköautojen määrän pitäisi olla 230 miljoonaa. [27]

Monien maiden hallitukset ja useat yritykset sitoutuvat vuosi vuodelta enemmän kestävään liikenteeseen. Euroopan unioni on ehdottanut, että vuodesta 2035 alkaen kaikkien myytävien autojen pitäisi olla päästöttömiä. Yhdysvalloissa Joe Biden on sanonut haluavansa, että sähköautot muodostaisivat puolet kaikista myydyistä autoista vuoteen 2030 mennessä. Useat muutkin maat ympäri maailmaa, mukaan lukien Kanada, Iso-Britannia, Japani ja useat Yhdysvaltojen osavaltiot ja Euroopan unionin jäsenmaat, ovat ryhtyneet toimiin rajoittaakseen polttoainekäyttöisten autojen myyntiä tai kieltääkseen ne kokonaan. [27]

Tämän mukaisesti useat ajoneuvovalmistajat ovat ilmoittaneet aikovansa lopettaa ICE-autojen myynnin tietyissä paikoissa ja siirtyä sähkökäyttöön. Esimerkiksi GM aikoo lopettaa bensiinikäyttöisten henkilöautojen, pakettiautojen ja maastoautojen valmistuksen vuoteen 2035 mennessä. Lisäksi Cadillac, Honda, Jaguar, Land Rover, Mercedes, Mini, Volvo ja Volkswagen ovat kaikki tehneet samansuuntaisia sitoumuksia. [27]

Vaikka emme tiedä tarkalleen, mitä tulevaisuus tuo tullessaan, nämä tekijät yhdessä osoittavat valoisaa tulevaisuutta sähköiselle liikenteelle. [27]

6 Lopuksi

Tämän työn kirjoittaminen ja tiedon etsiminen oli mielenkiintoista ja ennen kaikkea opettavaa. Moni meistä on joskus irrottanut vanhasta puhelimesta NiMH-akun tai antanut auton lyijyakulle käynnistysvirtaa ajattelematta sen enempää, kuinka vanha keksintö akku on ja miten sähköä on opeteltu varastoimaan jo satoja vuosia sitten. Akkujen kehitys on ollut valtavaa ja jatkuu vieläkin. Ensimmäisestä paristosta asti elektrolyytti on ollut nestemäistä tai imeytettynä johonkin, nyt suunnitteilla oleva kiinteä elektrolyytti on käytännössä täysin uusi keksintö.

Mielenkiintoista on myös se, että kuten tänäkin päivänä jo olemassa olevia automalleja muutetaan täyssähköisiksi tai hybrideiksi, myös ennen vanhaan hevöskärryihin laitettiin akut ja moottori. Ensimmäisissä ”sähköautoissa”(sähköhevöskärry) ei vielä ollut ladattavia akkuja vaan akku ajettiin loppuun ja vaihdettiin sitten akun vaihto pisteellä. Nykyäänkin jotkut sähköauton valmistajat ovat päätyneet samaiseen ratkaisuun, jotta ei tarvitsisi odottaa akun latautumista. Tammiukuussa 2022 iltalehti uutisoi: ”Nio tuo akunvaihtoasemat Eurooppaan” ja ”Ei tarvitse odotella akun latautumista, kun sen voi vaihtaa ladattuun hetkessä”.

Vielä pari vuotta sitten sähköautojen tulevaisuus näytti erittäinkin valoisalta, ja Suomessa on myyty viime vuodet varmasti ennätysmäärä sähköautoja polttoaineen hinnan noustua roimasti. Nyt tätä työtä kirjoittaessani Euroopassa on sota käynnissä ja sähkön hinta on moninkertaistunut. Historiasta katsottuna sodat ovat lisänneet kiinnostusta sähköiseen autoiluun, tulevaisuus näyttää, käykö näin tälläkin kertaa.

Lähteet

- 1 Ahtela, Jaakko; Hirsimäki, Kari & Pihlgren, Petri. Toimintaperiaate. Verkkoaineisto. <<https://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38118/s98/htyo/34/ra-kenne.shtml>>. Luettu 21.5.2022.
- 2 Liimatta, Jaakko & Martikainen Sonja. Voltan pylväs–historiallinen lähestymistapa sähkökemiassa. Verkkoaineisto. <https://www2.helsinki.fi/sites/default/files/atoms/files/sahkokemiallinen_pari_tuntisuunnitelma.pdf>. Luettu 9.1.2022.
- 3 Alarco, Jose & Talbot, Peter. The history and development of batteries. Verkkoaineisto. <<https://phys.org/news/2015-04-history-batteries.html>>. Luettu 9.1.2022.
- 4 Ziemann, Marcus. Kun Alessandro Volta pariston keksi – sähköön luultiin syntyvän lihaksissa. Verkkoaineisto. <<https://yle.fi/uutiset/3-7813781>>. Luettu 9.1.2022.
- 5 Calvert, JB. The electromagnetic telegraph. Verkkoaineisto. <<https://web.archive.org/web/20070804113714/http://www.du.edu/~jcalvert/tel/morse/morse.htm>>. Luettu: 13.2.2022.
- 6 Borvon, Gérard. History of the electrical units. Verkkoaineisto. <<http://seaus.free.fr/spip.php?article964>>. Luettu 13.2.2022.
- 7 Da Rosa, Aldo. Daniell Cell. Verkkoaineisto. <<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/daniell-cell>>. Luettu 13.2.2022.
- 8 Tikkanen, Amy. Gaston Planté. Verkkoaineisto. <<https://www.britannica.com/biography/Gaston-Plante>>. Luettu 6.3.2022.
- 9 Gaston Planté lead acid battery inventor. Verkkoaineisto. cherrymortgages.com. <http://www.cherrymortgages.com/historic_britain/Gaston_Plante_Lead_Acid_Battery.htm>. Luettu 12.3.2022.
- 10 Bobby. About the planté battery. Verkkoaineisto. <<https://www.upsbatterycenter.com/blog/plante-battery>>. Luettu 12.3.2022.
- 11 Du Rietz, Peter. Waldemar Jungner – Akkumulator. Verkkoaineisto. <<https://www.tekniskamuseet.se/en/learn-more/swedish-inventors/waldemar-jungner-accumulator>>. Luettu 13.3.2022.
- 12 Tuovinen, Jani. Ke4 Akut ja paristot. Verkkoaineisto. <http://akutjaparis-tot.blogspot.com/2013_04_01_archive.html>. Luettu 15.3.2022.
- 13 History of Nickel Iron batteries. Verkkoaineisto. Ironcore Batteries. <<http://www.ironcorebatteries.com.au/page5.php>>. Luettu 17.3.2022.

- 14 Nickel Metal Hydride (NiMH). Verkkoaineisto. Accutronics. <https://www.accutronics.co.uk/pages/nickel_metal_hydride_cell_technology.html>. Luettu 2.4.2022.
- 15 Nickel Metal Hydride Batteries. Verkkoaineisto. Electropedia. <<https://www.mpoweruk.com/nimh.htm>>. Luettu 2.4.2022.
- 16 Lin, Sheng-Lun. NiMH battery dissection. Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/figure/NiMH-battery-dissection_fig1_286969372>. Luettu 24.4.2022.
- 17 Baker, Bec. The history of the lithium-ion battery. Verkkoaineisto. <<https://www.fogstar.co.uk/blogs/fogstar-blog/the-history-of-the-lithium-ion-battery>>. Luettu 2.4.2022.
- 18 Liu, Zhao. The history of the lithium-ion battery. Verkkoaineisto. <<https://www.thermofisher.com/blog/microscopy/the-history-of-the-lithium-ion-battery/>>. Luettu 2.4.2022.
- 19 Yu, Liang; Shu & Yao, Shiwen. Recycling of cobalt by leaching from waste 18650-type lithium-ion batteries. Verkkoaineisto. <<https://www.semanticscholar.org/paper/Recycling-of-Cobalt-by-Liquid-Leaching-from-Waste-Yu-Shu/70ba1e95b9dc2a16614bc03d843640fffa8e8058>>. Luettu 24.4.2022.
- 20 Buchmann, Isidor. Types of lithium-ion. Verkkoaineisto. <<https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>>. Luettu 30.4.2022.
- 21 Scott, Alex. A solid opportunity for lithium-ion batteries. Verkkoaineisto. <<https://cen.acs.org/energy/energy-storage-/solid-opportunity-lithium-ion-batteries/99/i32>>. Luettu 25.10.2022.
- 22 Sun, Wei; Wang, Fei; Zhang, Bao; Zhang, Mengyi; Küpers, Verena; Ji, Xiao; Theile, Claudia; Bieker, Peter; Xu, Kang; Wang, Chunsheng & Winter, Martin. Science Daily. Verkkoaineisto. <<https://www.sciencedaily.com/releases/2021/01/210104110405.htm>>. Luettu 21.5.2022.
- 23 The invention of the electric motor 1800-1854. Verkkoaineisto. Doppelbauer, Martin. <<https://www.eti.kit.edu/english/1376.php>>. Luettu 9.1.2022.
- 24 What is dc motor. Verkkoaineisto. Parede.pt. <<https://fi.jf-parede.pt/what-is-dc-motor-basics>>. Luettu 19.7.2022.
- 25 Jacobi's motor. Verkkoaineisto. Elektrotechnisches Institut. <<https://www.eti.kit.edu/english/1382.php>>. Luettu 24.4.2022.
- 26 Sähköauto ei ole uusi keksintö. Verkkoaineisto. Paulraj, Pon. <<https://energyplaza.vattenfall.fi/blogi/sahkoauto-ei-ole-uusi-keksinto>>. Luettu 20.7.2022.

- 27 Simpson, Joseph D & Van Barlingen, Wesley. The history of electric cars. Verkkoaineisto. <<https://blog.evbox.com/electric-cars-history>>. Luettu 20.7.2022.
- 28 Wilson, Kevin A. A brief history of the electric car. Verkkoaineisto. <<https://www.caranddriver.com/features/g15378765/worth-the-watt-a-brief-history-of-the-electric-car-1830-to-present/>>. Luettu 27.7.2022.