



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

## **DIE BIERKISTE**

### Sähkökäyttöinen mikroauto

Eero Ruohola

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2017  
Sähkötekniikka  
Älykkäät koneet



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikka  
Älykkäät koneet

RUOHOLA, EERO  
Die Bierkiste  
Sähkökäyttöinen mikroauto

Opinnäytetyö 48 sivua  
Huhtikuu 2017

---

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa pieni nelipyöräinen päältä-ohjattava, sähkökäyttöinen kulkuneuvo, jonka konepeitoksi tulisi olutkori. Nimensä kulkuneuvo on saanut Saksasta (die Bierkiste, olutkori), jossa niille on oma kilpasarjansa. Julkisessa mediassa ei ole kuitenkaan ollut nähtävissä sähkötoimista vastaavaa, jolloin tuntui mielekkäältä suunnitella laite, jolla voi ajaa sekä sisä- että ulkoradoilla.

Työn tavoitteena oli perehtyä harjattomiin sähkömoottoreihin, niiden ohjaamiseen mikroprosessorilla ja perustason C++-ohjelmointiin. Tavoitteena oli lisäksi perehtyä kulkuneuvon hallintaan liittyviin tekniikoihin, kuten luistonestoon ja lukkiutumattomiin jarruihin vertailemalla etu- ja takapyörän nopeuksia keskenään. Kaikkiaan tavoitteena oli kehittää kompakti, tehokas ja nopea pieni kulkuneuvo, joka olisi kilpailukykyinen vastaavien polttomoottorikäyttöisten kanssa. Vertailtavia ominaisuuksia olivat muun muassa kiihtyvyys, huippunopeus, ohjattavuus ja jarrutusikätyminen.

Tarkoitus oli saada kaikki tekniikka mahtumaan pyöriä myöten korin sisäpuolelle siten, että ulkopuolelle jää ainoastaan ohjauspylväs ja ohjaustanko. Lisäksi kulkuneuvosta haluttiin saada aikaiseksi mahdollisimman tehokas. Tavoitteena oli teho-paino-suhde, joka olisi mahdollisimman lähellä 1:1:ä. Koska kyseessä on älykäs kone, haluttiin siihen myös luistonesto ja ABS-jarrujärjestelmä, jotta kulkuneuvon täysi potentiaali saataisiin hyötykäyttöön.

Kulkuneuvosta saatiin toteutettua toimiva kokonaisuus, joka liikkuu moottoreiden avulla eteenpäin ja toimii suunnitelmien mukaisesti. Huipputehoksi saatiin 16,9 kW, ja kokonaispaino akkuineen on 27 kg. Laskennallinen huippunopeus on noin 80 km/h. Ajanpuutteen vuoksi luistoneston, ABS-jarrujärjestelmän ja LCD-näytön toteutus rajattiin opinnäytetyön ulkopuolelle. Tulevaisuudessa kulkuneuvoa voitaisiin kehittää kevyemmän runkorakenteen avulla ja yksinkertaisemmalla voimansiirrolla, jolloin akustolle jäisi enemmän tilaa ja toimintasädetä saataisiin kasvatettua.

---

Asiasanat: harjaton sähkömoottori, ohjelmointi, mikroprosessori, olutkori

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical Engineering  
Intelligent Machines

RUOHOLA, EERO  
Die Bierkiste  
Electric Go-Kart

Bachelor's thesis 48 pages  
April 2017

---

The aim of this thesis was to plan and build a small four-wheel electric vehicle, which is operated from top. The engine cover would be an empty beer crate. The name for the vehicle comes from Germany (die Bierkiste, the beer crate), where there is a competition class for them. There have not been similar vehicles in public media, so it seemed to be a good idea to design a vehicle, which can be driven on both indoor as well as outdoor circuits.

The aim was also for the author to orientate on brushless electric motors, to control them by a microprocessor and to gain understanding of basic-level C++ programming. A further aim was to learn about the basic techniques of vehicle control, such as traction control and antilock brake system, by comparing the speeds of the front and back wheels. The overall goal was to develop a compact, powerful and fast little vehicle that would be competitive with comparable petrol-engined ones. Acceleration, top speed, handling and braking behavior were among the features used in the comparison.

In addition, one goal was that all the technology could be fitted inside the beer crate, including the wheels. Only the steering rack and handlebars would be visibly outside the crate. The purpose was to make the vehicle as powerful as possible. The aim was to try to get the weight / power ratio as close as possible to 1:1. As the vehicle in question was to be an intelligent machine, the purpose was to also implement working traction control and an antilock brake system, so that the full potential of the vehicle could be reached.

The planned functionality was achieved with the vehicle and it moves forward by its own motors. It does work as designed. Total maximum power is 16,9 kW and the vehicle itself weighs 27 kg with batteries. Theoretical top speed is around 80 km/h. Because of lack of time, traction control, the antilock brake system and working LCD screen were excluded from this thesis. In the future, the mentioned vehicle can be developed by implementing a lighter frame construction and simpler drive gear. That will make it possible to fit more batteries in the vehicle because of increased space. This way, the operating range can be increased.

---

Key words: brushless electric motor, programming, microprocessor, beer crate

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	OPINNÄYTETYÖN TAUSTA .....	7
2.1	Polttomoottorikäyttöiset toteutukset .....	7
2.2	Tekninen ja suorituskyyvyllinen esittely .....	8
2.3	Kilpailu ja sen idea.....	8
3	SÄHKÖTEKNINEN TARKASTELU .....	10
3.1	Sähkömoottoritekniikka .....	10
3.2	Harjattoman DC-moottorin toimintaperiaate .....	11
3.3	Nopeudensäädin.....	13
3.4	Akkutekniikka.....	14
3.5	Mikro-ohjaintekniikka.....	17
3.6	Tiedonsiirtotekniikka .....	19
3.6.1	TTL-Logiikka.....	20
3.6.2	RS232.....	20
3.6.3	UART.....	22
4	PÄÄKOMPONENTTIEN SUUNNITTELU JA VALINTAKRITEERIT .....	23
4.1	Vaatusmäärittely .....	23
4.2	Turvatoiminnot .....	23
4.3	Sähkötekniinen määrittely ja suunnittelu .....	25
4.3.1	Akusto ja johdotukset .....	25
4.3.2	Moottorit ja nopeudensäädin.....	31
4.3.3	Mikro-ohjaimet ja oheislaitteet .....	33
4.4	Ohjelmistotekniinen määrittely ja suunnittelu.....	35
4.5	Mekaaninen määrittely ja suunnittelu .....	37
4.6	Testaussuunnitelma.....	39
5	AJONEUVON KOKOAMINEN JA TESTIT .....	40
6	POHDINTA .....	46
	LÄHTEET .....	47

**LYHENTEET JA TERMIT**

ESC	Electronic Speed Controller
PWM	Pulse Width Modulation
TTL	Transistor Transistor-Logic
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
I2C	Inter-Integrated Circuit
ICSP	In-Circuit Serial Programming
SPI	Serial Peripheral Interface
IR	Internal Resistance
EMF	Electro Magnetic Force
SRAM	Static Random Access Memory
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
LiPo	Lithium Polymer
NiMH	Nickel Metal Hybrid
NiCd	Nickel Cadmium
AWG	American Wire Gauge
GSM	Global System for Mobile
IDE	Integrated Development Environment
CLK	Clock
INT	Integer
R/W	Read/Write

## 1 JOHDANTO

Idea tähän aiheeseen hahmottui jo vuonna 2010, jolloin tämän työn tekijä valmisteli silloista ammattikoulun opinnäytetyötään. Kaikki sai alkunsa internetin Youtube -videopalvelusta, josta löytyi mielenkiintoisia videoita, muun muassa polttomoottorilla varustettuja kulkuneuvoja, joiden konepeittona oli tyhjä olutkori. Kulkuneuvoille oli kaksi eri luokkaa, iso ja pieni. Isossa luokassa moottorina on 125-kuutioinen nelitahtimoottori ja pienessä luokassa 50-kuutioinen kaksitahtimoottori. Sen lisäksi kulkuneuvoilla oli suurehko fyysinen kokoero, kun isossa luokassa vain itse moottori oli olutkorin sisällä ja kaikki muu tekniikka sen ulkopuolella. Vuonna 2012 valmistui silloinen isompi versio kulkuneuvosta ja samalla kypsyi ajatus, että jonakin päivänä laitteesta pitää kehittää vielä pienempi versio. Oli täysin luonnollista, että kulkuneuvosta tulisi sähkökäyttöinen ja että kaikki tekniikka tulisi mahtumaan korin sisälle,

Täysin vastaavanlaista kulkuneuvoa ei ollut saatavilla kaupallisesti, jolloin se oli itse kehitettävä ja rakennettava. Vastaavia kulkuneuvoja oli jo olemassa eri toimintaperiaatteilla, joten piti suunnitella ja toteuttaa olemassa olevia ratkaisuja parempi ja joka olisi kilpailukykyisempi kaikilla eri osa-alueilla.

Bierkiste-kulkuneuvojen konsepti ei ole uusi. Kyseisiä kulkuneuvoja on tehty jo yli kymmenen vuotta, mutta kulkuneuvojen rakentelu on yleistymässä ja leviämässä muualle maailmaan varsinkin internetin välityksellä. Tässä opinnäytetyössä kuvatussa kulkuneuvosta tekee ainutlaatuisen se, että se toimii polttomoottorin asemesta kahdella tehokkaalla harjattomalla sähkömoottorilla ja sisältää huomattavan määrän elektroniikkaa.

Lajin syntymää on Saksa. Laji sai alkunsa 2003, kun saksalaiset opiskelijat Dirk, Christoph ja Hubert miettivät liiketalouden luennolla, mikä voisi olla tarpeeksi pieni varikkokulkuneuvo Nürburgringin 24 tunnin kilpailuun. Varikkokulkuneuvo ei saisi olla kuitenkaan liian suuri, jotta sitä olisi myös helppo kuljettaa paikasta toiseen. Tällöin toinen pojista ehdotti, että kulkuneuvo voisi olla suunnilleen olutkorin kokoinen. Pojat mittasivat monien autojen tavaratiloja ja päätyivät lopulta 90 cm maksimipituuteen. Ensimmäiset kolme kappaletta varikkokulkuneuvoja valmistui 2004, juuri ennen Nürburgringin 24 h kilpailua (Idee, oder besser legende der Bierkiste 2005). Laji on saavuttanut Saksassa laajan suosion ja sen vuoksi vuosittain järjestetään sisä- ja ulkokilpailuja, joissa kilpailijat pääsevät ottamaan mittaa ajotaidoistaan ja nopeudestaan.

## 2 OPINNÄYTETYÖN TAUSTA

### 2.1 Polttomoottorikäyttöiset toteutukset

Laji ei ole vielä saavuttanut niin sanottua ”välineurheilutasoa”, eivätkä kulkuneuvot ole vielä niin sanotusti ”high tech” -tasolla. Tämän vuoksi rakennetaan kulkuneuvon runko yleensä teräsputkesta kuution muotoiseksi. Tämä on halvin ja nopein toteutusvaihtoehto, koska rakentamiseen kuluisi lyhyimmillään noin yksi työpäivä. Kuvassa 1 näkyy polttomoottorisen sovelluksen yksinkertainen rakenne.



KUVA 1. Kuvakaappaus Bierkisten koeajo-videosta (Fahrende Bierkiste, Youtube 2013).

Toinen yleinen toteutustapa, eri moottorivaihtoehdoista ja niiden kiinnitystavoista riippuen, on käyttää erittäin paksua, olutkorin sisäpinta-alaa kattavaa alumiinilevyä, johon saadaan kiinnitettyä eturipustukset, taka-akselisto ja moottori. Tällöin istuinosa kiinnitetään yleensä moottoriin. Näistä toteutustavoista teräsputkikehikko on kestävin, koska penkki kiinnittyy kehikon yläosaan ja kehikko tukee kuljettajaa paremmin. Siihen on myös helpompi kiinnittää kaikki apulaitteet, kuten ohjauspylväs ja polttoainesäiliö.

## 2.2 Tekninen ja suorituskyvyllinen esittely

Sarjan kilpailusäännöissä moottorin iskutilavuus ei saa ylittää 50 kuutiosenttimetriä, vaikka korin sisälle ei juuri tätä suurempaa moottoria saisikaan mahtumaan. Moottorivaihtoehdot jaetaan kahteen osaan, vaihteellisiin ja vaihteettomiin moottoreihin. Sarjassa käytetään vain kaksitahtimoottoreita. Vaihteettoman, eli variaattori-moottorin etu on se, että jatkuvan kytkimen luistatuksen ansiosta huipputeho on jatkuvasti käytettävissä ja vaihteiden vaihtamiseen ei kulu arvokasta aikaa. Variaattori vie kuitenkin huomattavan paljon tilaa. Vaihteellinen moottori on hieman teknisempi ja vaatii lisäapulaitteita, kuten vaihdepolkimen ja kytkinkahvan.

Perinteisen 50-kuutioisen polttomoottorin teho viritysasteesta riippuen on muutamia hevosvoimia, eikä kovin suuriin moottoritehoihin ole mahdollista päästä verrattuna sähkömoottoriin ottaen huomioon moottorien väliset hyötysuhteet ja häviöt (Wells to wheels: car efficiency 2013). Yksi syy pienehköihin tehoihin on se, että kaksitahtimoottorin tehon maksimointi edellyttää, että pakoputken paisuntasäiliö on oikean kokoinen ja muotoinen. Tällaista korin sisälle on vaikea mahduttaa, koska jo pelkästään moottori vie suuren tilan (Kuva 1).

## 2.3 Kilpailu ja sen idea

Laji on saavuttanut suuren suosion Saksassa, jolloin myös kilpailuluokkia on monenlaisia. Olennaisimmat kilpailusäännöt kuitenkin ovat, että kilpailuun hyväksyttävän olutkorin saa kilpailun järjestäjältä vähän ennen kilpailun alkua ja korin paikalleen sovittamisen jälkeen korissa on oltava vähintään 90% alkuperäistä pintaa jäljellä. Myös pakoputken pää tai ilmansuodatin ei saa tulla korin ulkopuolelle yli viittä senttimetriä. Korissa täytyy olla myös neljä pyörää, toimivat jarrut ja maavara saa olla enintään 5 cm. Jarrut saavat olla joko pyörissä, taka-akselissa tai kuljettajan kengät voivat olla varustettuna pohjusteilla, jotka soveltuvat jarruttamiseen. Korissa täytyy myös olla ”tappokatkaisija” eli hätäseis-kytkin, jonka laukaiseva naru on kuljettajan ranteessa kiinni (6. Bierkisten-Rennen 21. Sept. 2014). Jos kaikki nämä ehdot ovat täyttyneet ja katsastus läpäisty, pääsee kilpailija osallistumaan aika-ajoihin, jossa paras aika kahdesta kierroksesta otetaan huomioon. Kuvassa 2 näkyy vuoden 2014 kilpailujen maalisuora.



KUVA 2. Kuva kilpailujen maalisuoralta (<http://www.neu.hohenthanner.de/brauerei/6-bierkisten-rennen.html> 2014).

### 3 SÄHKÖTEKNINEN TARKASTELU

Sähkömoottorien ominaisuudet ovat työlle yksi tärkeimmistä kriteereistä. Erityistä huomiota kiinnitettiin valinnassa komponenttien laadulle. Valittu sähkömoottori rajaa myös muut käytettävät tekniikat. Valinta tehtiin toimittajan ilmoittamien moottorin tehojen, virran ja jännitteen perusteella. Moottorin teho määrittelee voimansiirron komponenttien mitoituksen ja virta moottorien ohjauselektronikan mitoituksen. Moottorin käyttöjännite ja virta määrittävät soveltuvan akkutekniikan, akkujen kennojen lukumäärän ja C-lukeman. Nykyaikaisissa ja varsinkin RC-käyttöön soveltuvissa akuissa on ilmoitettu akun purku, sekä latausarvo (C-arvo), eli kerroin virralle, jolla akkua voidaan purkaa ja ladata.

#### 3.1 Sähkömoottoritekniikka

Työssä tutkitut moottorivaihtoehdot olivat seuraavia tyyppejä: oikosulkumoottori, hiiliharjallinen DC-moottori ja harjaton DC-moottori. Oikosulkumoottori jätettiin vaihtoehdoista pois, koska sitä käytettäessä kulkuneuvoon tarvittaisiin myös DC/AC-inverteri, joka muuntaa tasajännitteen vaihtojännitteeksi. Perusteena hylkäämiselle olivat suuri koko verrattuna käytettävissä olevaan tilaan ja jos käyttöjännitteeksi olisi tullut 230 VAC, sähköjärjestelmä olisi huomattavasti vaarallisempi mahdollisen sähköiskun kannalta. Oikosulkumoottorin hyötynä olisi ollut pienemmät johdinkoot suuren käyttöjännitteen ansiosta.

Vaihtoehdoiksi jäi siis harjallinen ja harjaton DC-moottori. Näistä moottoreista harjallista on helpompi ohjata, koska se ei tarvitse elektronista nopeudensäädintä, kuten harjaton moottori. Sen suurimmat haittapuolet ovat kuitenkin huono hyötysuhde (75-80%), eikä se ole täysin huoltovapaa. Lisäksi se sisältää hiiliharjat jotka kuluvat käytössä ja saataavuus pienikokoisissa tehokkaissa moottoreissa on huono. Harjallisten moottoreiden huono hyötysuhde perustuu osittain siihen, että moottoreissa ei ole kestopagneetteja ja osa syötettävästä energiasta kuluu roottorin magnetoitumiseen. On myös olemassa kestopagneetoituja harjallisia moottoreita, joissa hyötysuhde voi olla jopa 90%, mutta ne eivät ole kovin yleisiä (Formula student electric moottorin valinta 2011).

Moottoreiksi valittiin siis harjattomat harjallisten asemesta sen vuoksi, että ne ovat nykyaikaisemmat, teho/painosuhteeltaan pienemmät, energiatehokkaammat (hyötysuhde 93-95%) ja täysin huoltovapaat.

### 3.2 Harjattoman DC-moottorin toimintaperiaate

Harjattomassa DC-moottorissa on vähemmän osia verrattuna perinteiseen hiiliharjalliseen DC-moottoriin, koska kommutointi ei tapahdu hiiliharjojen avulla staattorin akselilla, vaan elektronisesti nopeudensäätimessä. Harjaton DC-moottori on rakenteeltaan siis hyvin yksinkertainen, sisältäen peruseräperiaatteeltaan vain staattorin ja roottorin.

Staattori koostuu yhteen laminoiduista teräslevyistä, joiden ympärillä kiertää moottorin vaiheiden käämit, riippuen siitä, onko moottori yksi, kaksi vai kolmivaiheinen. Myös käämien napaluku vaihtelee suuresti. Käämilangan vahvuudella ja käämintäkerrosten määrällä voidaan vaikuttaa moottorin vääntömomenttiin ja maksimipyörimisnopeuteen. Mitä vahvempaa kääminnässä käytetty kuparilanka on, sitä suurempia virtoja moottori kestää, ja täten myös omaa paremman maksimiväännön. Käämintäkerrosten määrä taas vaikuttaa pyörimisnopeuteen, ja mitä enemmän vaiheiden napojen ympärillä on kierroksia, sitä suurempia jännitteitä moottori kestää, jolloin myös pyörimisnopeudet ovat suurempia. Staattorin käämitys on yleensä kytketty tähteen.

Roottori on moottorin akselin lisäksi ainut pyörivä komponentti ja koostuu kestopäälakkeista. Yleisin magneettityyppi on ferriitti-magneetti, mutta hieman kalliimmissa moottoreissa käytetään myös paremman hyötysuhteen omaavia neodyymimagneetteja. Neodyymimagneetti on valmistettu seosmateriaalista, jolla on korkeampi magneettinen tiheys verrattuna perinteiseen permanentti-, eli ferriittimagneettiin. Tällä tarkoitetaan sitä, että moottorin kokoa voidaan pienentää, sen tarjoten samat ominaisuudet verrattuna perinteisellä magneettiteknologialla varustettuun moottoriin (Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals 2003). Moottorissa on magneetteja aina parillinen määrä ja niillä voidaan vaikuttaa moottorin vääntömomenttiin. Magneettien määrällä määritetään staattorin askelleen pituus magneetilta seuraavalle ja jos matka on liian lyhyt, se vaikuttaa vääntömomenttiin negatiivisesti. Roottorin magneetit ovat kiinnitetty roottorin kehään lämpöä kestäväällä liimalla. Roottori, eli moottorin pyörivä magnetoitu ulkokehä on yleensä ruuvilla kiinni moottorin akselissa, joka on laakeroitu moottorin runkoon, eli staattoriin.

Harjattoman DC-moottorin pyörimisnopeus ilmoitetaan kv-arvona, eli kierrosta/voltti. Moottorikohtaisen maksimipyörimisnopeuden saa siis kertomalla moottorin oman kv-arvon moottorin ilmoitetulla maksimi käyttöjännitteellä. Harjattoman DC-moottorin pyörimisnopeuden ja vääntömomentin suhde on lineaarinen ja sitä voi yleensä muuttaa säätämällä moottorin ajoitusta. Näin saadaan optimoitua moottori sopivalle kierrosalueelle ja/tai vääntömomentille käyttötarkoituksen mukaisesti. Moottorin ajoitusta ja pyörimisnopeutta säädetään kahdella eri tavalla ja tämä jakaa moottorit kahteen eri pääryhmään; anturoituihin moottoreihin ja anturoimattomiin moottoreihin.

Anturoitu harjaton DC-moottori sisältää yleensä kolme Hall-anturia, jotka ovat yhteydessä säätimen ohjauselektroniikkaan. Näissä moottoreissa Hall-anturit ovat yleensä kiinnitetty moottorin päätylevyyn, jota kääntämällä anturien asento staattorin napoihin nähdessä muuttuu. Näin saadaan säädettyä ajoitusta aikaisemmalle tai myöhäisemmälle, yleensä 0-30° välillä, jolla voidaan vaikuttaa vääntömomenttiin ja maksimi pyörimisnopeuteen (Tech Know-How: Motor Timing Explained 2017). On kuitenkin olemassa myös sovelluksia, jossa näitä moottorin arvoja ei tarvitse muuttaa, ja ne pysyvät koko moottorin eliniän vakiona. Näissä sovelluksissa hall-anturit ovat kiinteä osa moottorin rakennetta ja ajoitus pysyy aina samana. Anturoiduissa moottoreissa voidaan pyörimisnopeutta säätää huomattavasti tarkemmin kuin anturoimattomissa, koska antureilta saadaan jatkuvasti tarkka staattorin asentotieto. Tämä asentotieto kulkee nopeudensäätimelle, joka tekee kommutoinnin elektronisesti ja säätää näin moottorin pyörimisnopeutta.

Anturoimattomissa DC-moottoreissa ajoitus säädetään nopeudensäätimen kautta. Nopeudensäätöön tarvittava asentotieto saadaan anturoimattomassa moottorissa ohjaamattomaan vaiheeseen indusoituvalla jännitteellä. Moottorin jokaisella syklillä yksi vaihe on johtamattomassa tilassa, jolloin tämän vaiheen käämiin indusoituu jännite ympärillä pyörivän roottorin magneettikentän vaikutuksesta. Tästä seuraa takaisinkytkentä nopeudensäätimelle jolloin se suorittaa kommutoinnin (Harjattoman DC-moottorin ohjaus 2010).

### 3.3 Nopeudensäädin

Nopeudensäädin säätää moottorien pyörimisnopeutta sen mukaan, kuinka suuren pulssinleveyden säädin sitä ohjaavalta mikroprosessorilta saa. Säätimen päätoimintaperiaate on säätää harjattoman moottorin navoille kulkevan virran suuruutta oikealla ajanhetkellä. Nopeudensäädin siis tulkitsee staattorin asentoa ja ennakon mukaisesti ohjaa oikean moottorin asennon tullessa virtapulssin oikeille käämeille. Koska käytetty järjestelmä on kolmivaiheinen, tapahtuu ”sytytys” vielä kahdella eri käämiryhmällä tämän jälkeen. Matalalla ennakolla saadaan maksimivääntö matalilla kierroksilla ja suurella ennakolla maksimivääntö saadaan korkeilla kierroksilla.

EV-käyttöön tarkoitettu säädin olisi ollut tarkoituksen mukaisempi ja pidemmälle kehittynyt säädin, mutta se olisi ollut aivan liian suuri. Näiden kahden säädintekniikan suurimmat erot ovat seuraavat: RC-nopeudensäädin saa ohjauspulssinsa suoraan radiolähettimeltä vastaanottimen kautta, jolloin tässä tapauksessa joudutaan vastaanotin korvaamaan mikroprosessorilla (muuntamaan saatu signaali). Hall-anturi korvaa radiolähettimen (antaa kaasun arvon). EV-säätimessä taas kotelon sisällä on jo valmiiksi integroituna mikroprosessori, joten erillistä ohjainlaitetta ei tarvita. EV-säätimessä on myös monta muuta etua verrattuna RC-säätimeen, kuten joissain tapauksessa integroitu tuuletin jäähdytystä varten, ylikuormitussuoja liian suuren jännitteen ja virran varalle, sekä ylikuumenemissuoja, joka sammuttaa säätimen, mikäli se kuumenee liikaa.

Toinen huomattava ero on se, että EV-säätimessä yleensä on integroitu virran mittaus (havaitsee liian korkean virtapiikin ja rajoittaa niitä tai ylikuormitussuoja menee päälle). RC-käyttöön tarkoitettu säädin voi rikkoontua, kun säätimissä ei yleensä ole ylikuormitussuojaa. Tällöin hetkellinen liian suuri piikkivirta johtaa liian suuriin piikkijännitteisiin, jota joko säätimen kondensaattorit tai puolijohteet eivät kestä ja rikkoutuvat.

Moottorin säätöä varten EV-säätimissä on kehittyneempi Hall-anturitekniikka, joka mahdollistaa tarkemman säädön, sillä staattorin asento tunnustetaan hyvin jo alhaisilla kierroksilla. RC-säätimissä käytetään EMF-jännitteen mittausta (Electro Motive Force) havaitsemaan staattorin asento vaiheen johtimesta siihen indusoituneen jännitteen avulla, jonka perusteella säädin tekee elektronisen kommutaation. Tämä tarkoittaa sitä, että matalilla kierroksilla säätämiseen tarvittava signaali staattorin asennosta on hyvin heikko ja kasvaa vasta moottorin kierrosten kasvaessa. Hall-anturin etu säätimissä on se, että hyvin

tarkan asennon tunnistuksen vuoksi matalilla kierroksilla saadaan tuotettua parempi vääntö (RC-ESC vs E-Bike controllers 2010). Säätimestä, joka tukee Hall-anturi-tekniikkaa, ei ole kuitenkaan mitään hyötyä, jos sillä ohjattava moottori ei omaa Hall-antureita.

### 3.4 Akkutekniikka

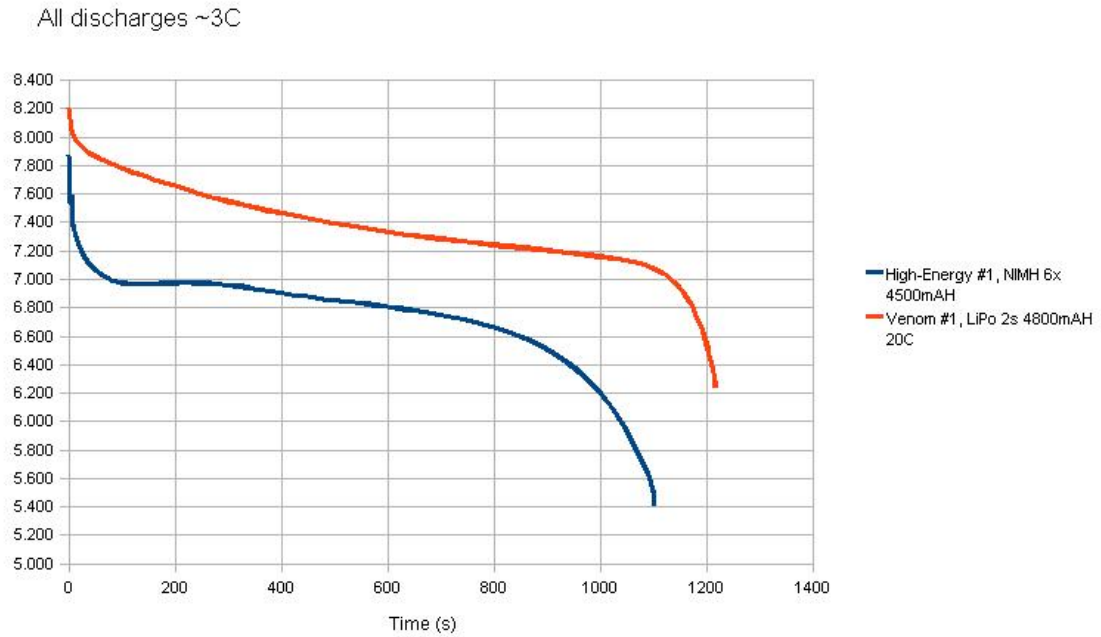
LiPo (Lithium Polymer) -akkutyypillä on myös muutama muu kilpailija, kuten NiCd (Nickel Cadmium) ja NiMH (Nickel-Metal Hydride). LiPo-akut ovat kuitenkin pääsääntöisesti kevyempiä kuin edellä mainitut, omaavat suuremman kapasiteetin ja niitä pystyy purkamaan sekä lataamaan huomattavasti suuremmalla virralla. LiPo-akun eräs huomattava etu on, että niitä on saatavilla kaiken muotoisina ja kokoisina (Kuva 3).

Sähkökäyttöisissä kulkuneuvoissa akuilla on suuri merkitys kulkuneuvon tehoon ja toimintaan. Yksi suuri ero on muun muassa, että lyijyakku alkaa tyhjäntyessään ”hyytymään” tasaisesti ennen kuin virta loppuu. LiPo-akussa taas ladattu varaus on käytössä lähes loppuun asti hyvin tasaisesti ennen kuin kuormitettavuus laskee kennojännitteen äkillisen laskun takia. LiPo-akkuja on saatavilla myös monilla eri kennomäärillä, jolloin ei ole tarpeen kytkeä montaa akkua sarjaan.

Akun etiketti kertoo kaiken tarvittavan tiedon akusta sen käyttöä ja latausta varten. Merkittävin tieto mikä puuttuu, on IR-arvo. IR eli Internal Resistance kertoo akun kennojen sisäisen resistanssin. Tätä arvoa ei kerrota akun etiketissä, koska resistanssin arvo muuttuu akun eliniän aikana. Resistanssi vastustaa virran kulkua, eli tässä tapauksessa akun purkamista ja lataamista. Mitä pienempi akun sisäinen resistanssi on, sitä helpommin virta pääsee kulkemaan akusta pois sekä ladattaessa sisälle ja sitä energiatehokkaampi akku on. Akun sisäisen resistanssin mittaukseen on olemassa markkinoilla mittalaitteita, joilla sen voi mitata, mutta halvempi vaihtoehto yleensä on hankkia sellainen laturi, joka ilmoittaa jokaisen kennon sisäisen resistanssin erikseen. Akun vanhetessa sisäinen resistanssi kasvaa ja osa akun energiasta alkaa purkautua lämpönä sen sijaan että se kulkisi virtana säätimelle ja moottoreille.

Tämän lisäksi on ilmoitettu kapasiteetti, kennojen lukumäärä ja kennoista summautuva akun kokonaisjännite. Joissain akuissa on ilmoitettu myös akun varauskapasiteetti wattitunteina. Vanhemman sukupolven LiPo-akuissa voi olla ilmoitettu kennojen lukumäärä seuraavasti: 2S2P. Tämä tarkoittaa, että akussa on kaksi ryhmää sarjassa (Serial) ja kaksi rinnakkain (Parallel), eli oikeastaan neljä erillistä kennoa. C-arvo kertoo kaikessa yksinkertaisuudessaan, kuinka nopeasti ja kuinka suurella virralla akkua voidaan ladata ja purkaa. Jos esimerkiksi akku on kapasiteetiltaan 6000mAh, eli 6Ah ja sen C-arvo on 50C, voidaan akkua purkaa 6Ah x 50C, eli 300 ampeerin virralla. Vastaavasti jos latausarvo on esim. 3C, niin latausvirta saa maksimissaan olla 6Ah x 3C, eli 18 ampeeria. Joissain akuissa on ilmoitettu myös hetkellinen maksimi C-arvo. Se tarkoittaa sitä, että akkua saa 10 sekunnin ajan kuormittaa huomattavasti suuremmalla purkuvirralla. Joillakin akuilla tämä arvo voi olla jopa 100 ampeeria suurempi kuin jatkuva maksimi purkuvirta.

Kuten Kuviosta 1 voidaan huomata, on LiPo-akussa pienempi jännitteen alenema alettaessa kuormittaa akkua, kun taas NiMH-akku kärsii huomattavan suuresta jännitteen alenemasta kuormituksen aikana. Tämä jännitealenema vaikuttaa suoraan sähkömoottorin tehoon ja siitä johtuen laadukas akku onkin yksi tapa ”virittää” ajoneuvoa, jos haluaa lisää suorituskykyä. LiPo-akkua voidaan myös hyödyntää pidempään, koska jännite laskee vain vähän kunnes akku on lähes tyhjä, jolloin jännite romahtaa nopeasti. NiMH-akussa jännite alkaa laskemaan rauhallisesti pienemmäksi jo melkein akun varaustilan ollessa puolivälissä. Purku- ja varauskäyrät vaihtelevat akun koosta, merkistä, purkuvirrasta ja lämpötilasta riippuen, mutta pääperiaatteiltaan ja ulkoasultaan NiMH- ja LiPo-akkujen varauksen purkukäyrät pysyvät samanlaisina.



KUVIO 1. Kahden erilaisen akkutyypin purkautumiskäyrät ([http://access.time.angel-fire.com/battery\\_test\\_data\\_01.html](http://access.time.angel-fire.com/battery_test_data_01.html) 2007-2009).

Kuvassa 3 näkyy taka-alalla 8000 mAh LiPo-akut ja niiden edessä neliytiminen akkulaturi, jolla saa kaikki neljä akkua ladattua saman aikaisesti.



KUVA 3. Tyypillinen LiPo-akkulaturi ja akku. (Kuva: Eero Ruohola 2016)

LiPo-akkutekniikassa on myös omat heikkoutensa. Koska ne ovat energiatehokkaita ja niihin saa varastoitua suuren määrän energiaa, ovat ne myös paloalttiita ja hyvin vaarallisia väärin kohdeltuina. Kuvassa 4 LiPo-akku on ladattu liian täyteen ja on sen seurauksena syttynyt palamaan.



KUVA 4. Kuva liian täyteen ladatusta LiPo-akusta, joka on syttynyt palamaan. (<http://www.flitetest.com/articles/lipo-battery-bunker> 2014).

LiPo-akuissa on myös se haittapuoli, että ne ovat hyvin tarkkoja säilytyslämpötilasta, käytettävästä laturista ja siitä, ettei kennojännitettä vahingossakaan aliteta tai ylitetä. Mikäli akkua puretaan liikaa, ja kennojännitteen arvo laskee liian alhaiseksi, kennot voivat vaurioitua. Ladattaessa taas on huolehdittava, ettei sallittu kennojännite ylity, koska silloin akku voi syttyä palamaan. LiPo-akut eivät ole yhtä pitkäikäisiä kuin NiCd- tai NiMH-akut ja kestävät keskimäärin 300-400 latauskertaa (A Guide to Understanding LiPo Batteries 2012).

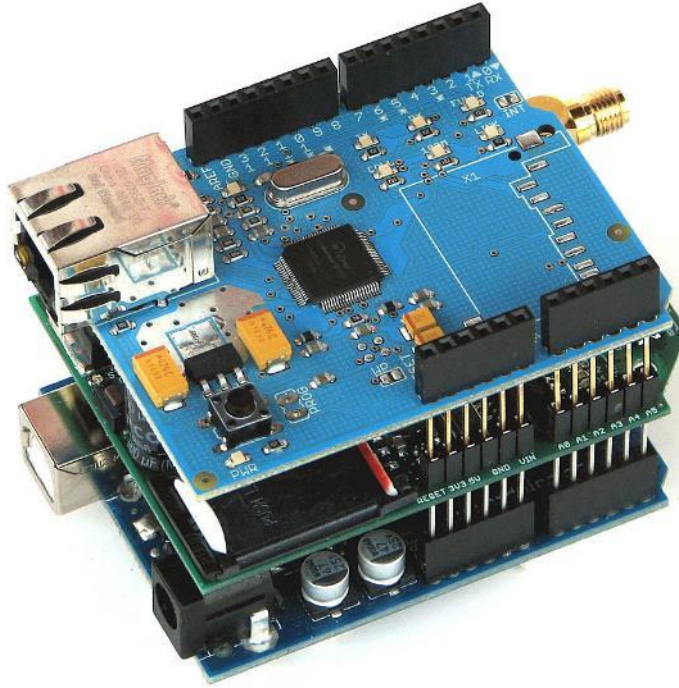
### 3.5 Mikro-ohjaintekniikka

Jokaisella sähkökomponentilla on oma osansa projektissa, mutta sähkökäyttöisen kuluneuvon keskeisin komponentti on mikro-ohjain (Kuva 5), joka ohjaa kaikkia sähköjärjestelmiä.

Ohjauselektronikassa päädyttiin kahteen Arduino-mikroprosessoriin. Nämä prosessorit eroavat toisistaan suuresti mm. piirilevyn koon, prosessorin tehon ja I/O-liitäntöjen välillä. Näistä prosessoreista suurempi on Arduino Mega, joka valittiin suuren I/O-määrän vuoksi. Suuri I/O-määrä tarvitaan ohjaamaan kaikkia toimilaitteita, kuten kaasua, jarrua, luistonestoa ja ABS-toimintoa. Myös moottorin ja nopeudensäätimen ylikuumentumisen mittaaminen ja suojatoiminnot ohjataan Arduino Megan kautta. Koska Arduino Megassa on kuitenkin rajallisesti suoritintehoa, ei ohjelmakiertoa haluta hidastaa turhaan, jotta mm. kaasun ja jarrun vasteaika pysyisi mahdollisimman lyhyenä. Tästä johtuen käytetään Arduino Nanoa, jolle siirretään I2C- tai RS485-väylän avulla Arduino Megan toimilaitteilta tuleva data. Näitä ovat esimerkiksi lämpötilatiedot, nopeus, akuston varaustila. Edellä mainittu kerätty data piirretään LCD-näytölle, jolloin säästetään kriittisiä toimintoja ohjaavalta prosessorilta tehoa ja ohjelmakierron vasteaika pysyy mahdollisimman lyhyenä.

Arduino Mega on avoimen lähdekoodin kehitysalusta eli yksinkertainen piirilevy, jonka ydin on Atmelin valmistama ATmega 2560-mikrokontrolleri. Arduinoa Megaa voidaankin siis pitää hyvin yksinkertaisena tietokoneena, koska siinä on kaikki toimintaan tarvittavat komponentit valmiina, jolloin siihen voidaan suoraan siirtää koodi sisään ja kytkeä virta päälle. ATmega 2560:n lisäksi Arduinossa on 16MHz oskillaattori, 7-12v sisääntulojännitteelle liitin ja sisäänrakennettu regulaattori, joka alentaa jännitteen 5 ja 3,3 volttiin, USB-liitäntä, reset-painike ja ICSP-liitäntä. Arduino Megan kokonais I/O-määrä on 54. Niistä 16 on analogiatuloja ja loput digitaalituloja ja -lähtöjä. Näistä digitaalilähdöistä viittätoista voidaan käyttää PWM lähtöinä. Levyssä on myös neljä kappaletta UART-tiedonsiirtoon tarkoitettua I/O:ta. Maksimi virta I/O:ta kohden on 20 mA, SRAM:ia on 8 KB, EEPROM:ia 4 KB ja kellotaajuus 16 Mhz (Arduino Mega 2560 & Arduino Genuino 2560 2017).

Koska kyse on kehitysalustasta, voidaan alustan päälle kuvan 5 mukaisesti koota niin sanottuja ”shieldejä” eli kilpiä, joka kiinnittyy Arduinoon sen I/O-liitännöistä. Alla olevassa kuvassa Arduino Unon päällä oleva GSM- ja Ethernet shield.



KUVA 5. Arduino Uno ja sen päällä olevat ”kilvet” eli lisäosat. Kuvassa keskimmäisenä GSM-kilpi ja päällimmäisenä Ethernet-kilpi. (<http://www.hwkitchen.com/products/gsm-playground/> 2014).

Arduinolla voidaan kehittää esimerkiksi itsenäisiä interaktiivisia laitteita. Arduinon ohjelmoimisesta tekee helppoa se, että sen ohjelmointiin käytetään USB-porttia, jolloin sarjaliikenneporttia ei tarvita. Arduino ohjelmoidaan käyttämällä IDE-ohjelmistoa (Integrated Development Environment), josta ohjelmakoodi siirretään USB-portin kautta Arduinon mikroprosessorille (Banzi 2011, 17).

### 3.6 Tiedonsiirtotekniikka

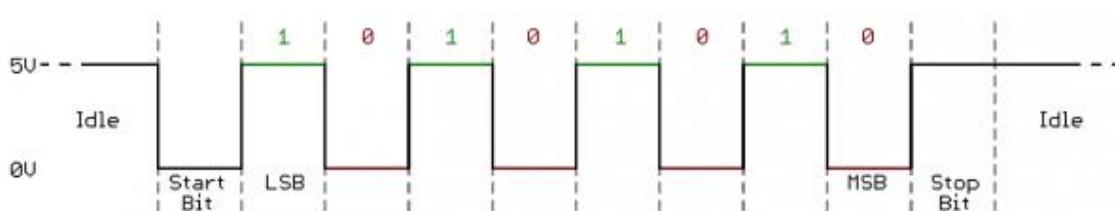
Opinnäytetyössä päädyttiin käyttämään epäsynkronista sarjaliitettä, koska se täyttää tiedonsiirrolle asetetut vaatimukset. Sarjaliitännät voidaan jakaa kahteen pääryhmään; synkroniseen ja epäsynkroniseen. Synkroninen sarjaliitettä tarkoittaa sitä, että tiedonsiirtoon käytetään aina järjestelmän kellotaajuutta, eli jokaisen kellotaajuuden pulssin nousevalla reunalla siirretään yksi bitti. Tämä tarkoittaa sitä, että jos useampi laite on yhdistetty toisiinsa sarjaliikenneväylän avulla, jakavat ne keskenään saman kellotaajuuden. Tällaisia synkronisia sarjaliikenneväyliä ovat esimerkiksi I2C ja SPI väylä.

Synkroninen sarjaliikenneväylä tarvitsee toimiakseen vähintään kaksi johdinta, joista toinen on kelloaajuudelle. Kuitenkin Arduinoa käytettäessä laajemmissa sovelluksissa, on monesti I/O-liitännöistä pulaa. Tämän vuoksi epäsynkroniset sarjaliitännät ovat suosittuja sulautetuissa järjestelmissä, koska ne eivät vaadi kelloaajuutta toimiakseen, eivätkä tarvitse yhtä ylimääräistä johdinta.

Epäsynkronisessa sarjaliikenneväylässä tiedonsiirtoon käytetään kelloaajuuden sijaan baud ratea eli bits per second. Se kertoo kuinka monta bittiä sekunnissa väylässä kulkee ja yleisin käytetty nopeus on 9600 bittiä sekunnissa. Alin standardinopeus on 1200 bps ja ylin 115200 bps. Kuitenkin suurimmilla nopeuksilla voi alkaa esiintymään virheitä tiedonsiirrossa, kun kelloaajuus ja näytteenottotaajuus vastaanottavassa päässä ei enää pysy perässä.

### 3.6.1 TTL-Logiikka

Mikroprosessorit kuten Arduino, kommunikoivat TTL-tasoisesta sarjaliikenteen avulla (Kuvio 2). Bitin siirtoon tarvittava pulssin nouseva reuna on Arduinon levyiltä saatava signaali, jolla on vain kaksi arvoa: nolla (0V) ja yksi (5V). Bitti siirtyy, kun signaalin taso muuttuu nolasta viiteen volttiin.

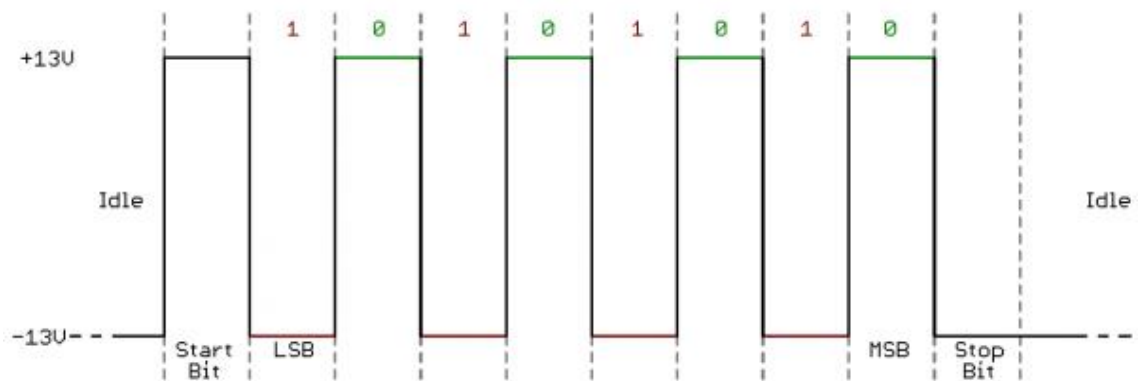


KUVIO 2. TTL-tasoisesta sarjaliikenteen tiedonsiirtoperiaate (<https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-communication> 2014).

### 3.6.2 RS232

RS232-väylän tiedonsiirto on toiminnaltaan vastaava TTL-tasoisesta sarjaliikenteen kanssa, mutta signaalit ovat käänteisiä ja käytössä on eri jännitealue. RS232:ssa loogiset jännitetasot ovat seuraavat:  $-13V = 1$  ja  $+13V = 0$ . RS232 toimii kuitenkin laajalla jännitealueella;  $\pm 3V$ :sta aina  $\pm 25V$ :iin asti (Kuvio 3). Syy siihen, miksi ne eivät ole täysin

sama asia, on se, että TTL-tasoisessa sarjaliikenteessä positiivinen jännite tarkoittaa ”tyhjäkäyntiä”, 1-bittiä tai lopetusbittiä. RS232:ssa samat asiat toteuttaa negatiivinen jännite. Vastaavasti TTL-tasoisessa sarjaliikenteessä 0 V jännite vastaa samaa asiaa RS232:n positiivisen jännitteen kanssa. Koska TTL ei tarvitse toimiakseen negatiivista jännitettä, sitä on huomattavasti helpompi käyttää sulautetuissa järjestelmissä ja on sen vuoksi yleisempi. Jos kuitenkin yhdistetään kaksi sarjaväylälaitetta toisiinsa, joista toinen käyttää TTL-tasoisista signalointia ja toinen RS 232:a, on erittäin tärkeää varmistaa, että ne toimivat keskenään samalla jännitealueella. Myös signaalit täytyy kääntää, jotta nouseva ja laskeva reuna tarkoittaa molemmissa laitteissa samaa asiaa.



KUVIO 3. RS232-väylän tiedonsiirtoperiaate (<https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-communication> 2014).

### 3.6.3 UART

UART on universaali epäsynkroninen vastaanotin / lähetin. Se siis muuntaa vastaanotetun rinnakkaisdatan sarjamuotoiseksi paketiksi. Se toimii siis eräänlaisena välikätenä, mutta ei ota kantaa millaisella fyysisellä signaalitasolla sarjamuotoinen datapaketti siirretään eteenpäin. Tästä syystä UART tarvitsee fyysisen tason protokollan, niin kuin esimerkiksi TTL:n tai RS232:sen. Sulautetun järjestelmän mikrokontrolleri yleensä sisältää tällaisen UART-liitännän, mutta kaikissa sitä ei kuitenkaan välttämättä ole. Esimerkiksi Arduinon Unossa on vain yksi UART, kun taas Arduinon Megassa on neljä. UART:in rinnakkaispuolelle tulee digitaaliliitäntöjä, joita kutsutaan dataväyläksi ja muutama kappale niin sanottuja ohjaus I/O:ta, kuten CLK, INT ja R/W (MAX232x Dual EIA-232 Drivers/Receivers 2014).

## 4 PÄÄKOMPONENTTIEN SUUNNITTELU JA VALINTAKRITEERIT

### 4.1 Vaatimusmäärittely

Huomattavin vaatimus valmiille kulkuneuvolle on, että sen täytyy kestää hieman isokoisempaaakin kuljettajaa. Sen lisäksi suorituskyvyn täytyy olla riittävän suuri ja kulkuneuvolla täytyy pystyä ajamaan riittävän pitkä aika ennen latausta. Koska tilaa on käytössä vähän ja pakattu täyteen tekniikkaa, ei ylimääräisiä tukirakenteita ole juuri voitu lisätä. Myös ripustuksien tulee kestää suuret rasitukset nopeissa mutkissa sekä epätasaisuuksissa ja sähköjen täytyy toimia luotettavasti, ettei polyuretaani-pyöristä johtuva värinä saa aikaan liittimien irtoilua ja mahdollista oikosulkuja. Laitteen tulee olla helposti ladattavissa niin, että akkupaketin saa nopeasti ja helposti irti yhtenä pakettina. Tämä parantaisi turvallisuutta, jos akut syttyisivät palamaan.

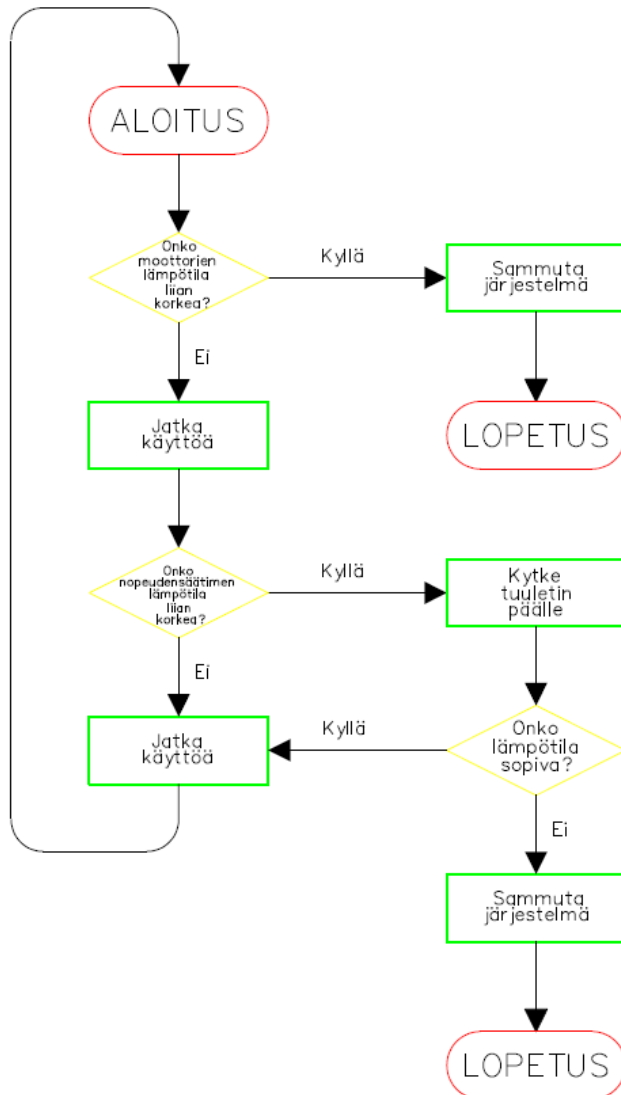
### 4.2 Turvatoiminnot

Ihmisen vasteaika on tutussa tilanteessa noin 200-250 millisekuntia kun taas ennalta arvaamattomassa tilanteessa se on noin 800-1200 millisekuntia eli noin sekunnin luokkaa. Reaktioaika tosin heikkenee vanhenemisen myötä ja voi olla vielä hitaampikin (Testaa reaktionopeutesi 2015).

Jos ihmisen vasteaika olisi yksi sekunti, ja takajarru olisi 80 km/h vauhdissa sekunnin lukossa, ehtisi laite liikkua takajarru lukossa 22,2 m eteenpäin ja voi johtaa vaikka kaatumiseen. Tästä johtuen jarrujen sähköistys on erityisen tärkeä osa automaatiojärjestelmää. Turvallisuuden paranemisen lisäksi se estää myös renkaiden kulumista kulmikkaaksi.

Tärkein osa automaatiojärjestelmää ovat turvatoiminnot. Ensimmäinen näistä on ohjauksen katkaiseminen ranteeseen kiinnitettävällä turvakytkimen narulla. Tämä kytkin katkaisee ongelmatilanteessa ohjausjännitteen ja pysäyttää kulkuneuvon. Tyypillinen tällainen tilanne on kuljettajan putoaminen kyydistä syystä tai toisesta. Toinen turvatoiminnoista on kulkuneuvon komponenttien lämpötilaseuranta. Lämpötilaseurannassa seurataan ykkös- ja kakkosmoottorin nopeudensäädintä. Arduino Megaan asetetaan sallittu maksimilämpötila molemmille moottoreille ja nopeudensäätimelle. Jos tämä lämpötilan

arvo ylittyy säätimen osalta, kytkee prosessori tuulettimet jäähdyttämään nopeuden säätimen jäähdytys elementtiä. Mikäli moottoreille asetettu lämpötila-arvo taas ylittyy, katkaistaan mikroprosessorin avulla kaasulta tuleva signaali, että ne jäähtyisivät paremmin. Kuviossa 4 on kuvattu lämpötilaseurannan ohjelmakierto.



KUVIO 4. Automaatiojärjestelmän lämpötilaseurannan vuokaavio (Eero Ruohola 2017)

Kaikki tämä data siirtyy Arduino Megan kautta TX-liittimen kautta Arduino Nanolle, jonka se tulostaa LCD-näytölle. Näyttö on kooltaan 64 x 128 pikseliä, joka on riittävä laitteen toiminnan seurantaan.

## 4.3 Sähkötekniinen määrittely ja suunnittelu

### 4.3.1 Akusto ja johdotukset

Akustossa päädyttiin Turnigyn valmistamiin akkuihin, jotka ovat hinta-laatusuhteeltaan hyviä ja helposti saatavissa. Lisäksi niiden saatavuus monissa eri mitoissa, kennomäärissä ja erilaisilla C-lukemilla oli valintaan vaikuttava tekijä. Aluksi päädyttiin Zippy Flight Max -akustosarjaan. Kyseinen sarja on Turnigyn akustoista kapasiteetiltaan suurin, ja omaa tarpeeksi suuren C-lukeman (Kuva 3). Valittujen akkujen varauskapasiteetti on 8000 mAh, kennorakenne 6S ja purkuvirran maksimikerroin 30C.  $30 \times 8 \text{ Ah} = 240$ , joka tarkoittaa, että kyseistä akkua saa purkaa maksimissaan 240 ampeerin virralla.

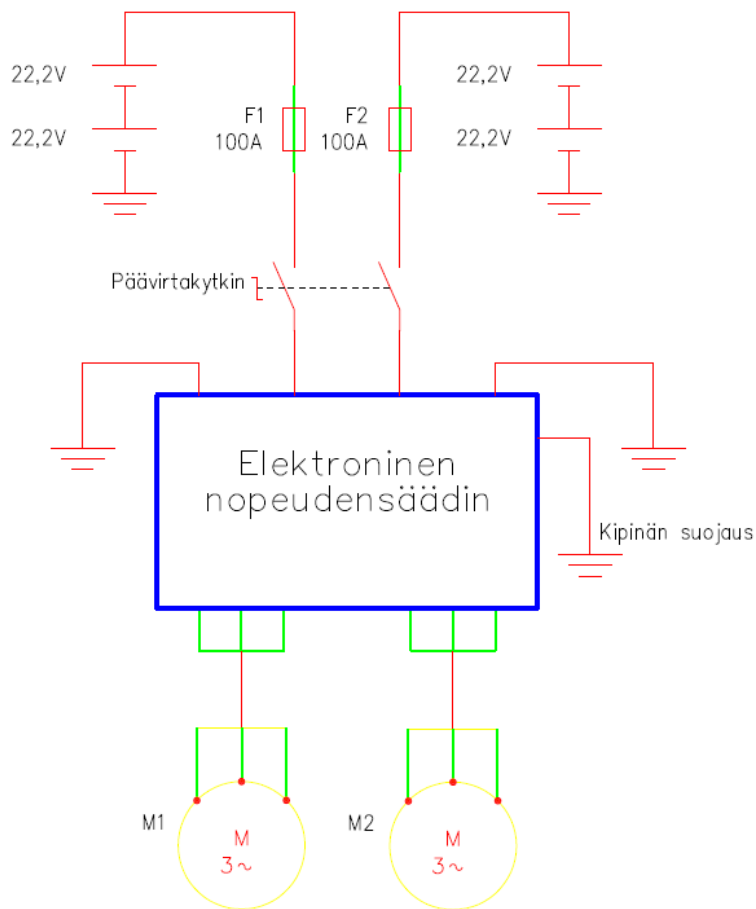
Akkukotelo valmistettiin aluksi edellä mainituille akuille, mutta koska tilan puute oli suuri, akkujen hyvästä asettelusta huolimatta kotelosta tuli akuille hyvin ahdas. Tästä johtuen koteloon ei kunnolla mahtunut pehmustetta suojaamaan akustoja ja ensimmäisen koeajon jälkeen tämä ilmenikin vaurioina akustossa, varsinkin kennojen sisäänpainumisena. Akkujen fyysinen vaurioituminen on vaarallista, koska LiPo-akut ovat hyvin tulenarvoja, mikäli kennot menevät keskenään oikosulkuun. Tästä johtuen päädyttiin vaihtamaan akut kapasiteetiltaan puolet pienempiin Basher-sarjan akkuihin (4000 mAh 6S 65C). Koska akkujen varauskapasiteetti puolittuu, myös ajoaika puolittuu. Kennomäärä pysyy kuitenkin samana, joten ajoneuvon teho ei laske. Fyysisen kokonsa johdosta akkukoteloon mahtuu huomattavasti enemmän pehmustetta. Lisäksi tämä akku eroaa edellisestä siten, että siinä on kovat muovikuoret suojaamassa herkkää kennostoa.

Virta johdetaan moottoreille neljältä 6S-akulta. Molemmille moottoreille on oma syöttönsä ja sen vuoksi molemmille piireille on kaksi akkua. Akut on kytketty sarjaan molemmille moottoreille, jolloin saadaan haluttu käyttöjännite, mutta kapasiteetti pysyy yhden akun tasolla. 6S-akuilla päästiin 44,4 voltin käyttöjännitteeseen, vaikka moottoreista maksimiteho saataisiin vasta 54 voltilla. Tehon laskentakaavan (1) mukaisesti 54 voltilla saadaan maksimivirran 190 ampeeria mukaan huipputehoksi 20,5 kW, kun taas käytetyllä jännitteellä noin 17 kW.

$$P = U \cdot I \quad (1)$$

Näillä akuilla päästään lähelle maksimikäyttöjännitettä. Saatavilla oleva laturi tukee kuusikennoista akkua, muttei enää seitsemänkennoista.

Akustolta lähtee 8 AWG johtimet (American Wire Gauge), joka vastaa neliömillimetreissä  $8,37 \text{ mm}^2$ :n johdinpoikkipinta-alaa. Johtimet yhdistyvät seuraaviin akkuihin kullailla  $5,5 \text{ mm}$ :n Bullet-tyyppisillä banaaniliittimillä, jotka on kiinnitetty juottamalla. Heti akuston johtimien jälkeen johdinkoko vaihtuu suurempaan 16-neliöiseen, jotta purkausvirran kasvaessa säästyttäisiin johtimien lämpenemiseltä. Akuston negatiiviset navat on kytketty kaapelikengillä suoraan alumiinirunkoon M8-pulteilla. Positiiviset johtimet on kytketty omien piirien sulakkeiden kautta pääkytkimelle. Näin suurien virtojen suojaaminen sulakkeilla edellyttää laadukkaiden sulakepohjien käyttöä. Sulakkeita varten päädyttiin käyttämään autoäänentoistolaitteissa käytettyjä pohjia. Autoäänentoistolaitteissa esiintyy saman kokoluokan virtoja ja niissä käytetyt komponentit ovat ajoneuvokäyttöön suunniteltuja. Sulakkeet ovat 100-ampeeriset, koska testien aikana virtapiikit eivät tätä arvoa ylittäneet. Sulakkeilta menee syöttö suoraan pääkytkimelle, joka on venekäyttöön tarkoitettu. Kuviossa 5 on esitetty kulkuneuvon pääpiirikaavio.



KUVIO 5. Pääpiirikaavio nopeudensäätimen ja moottoreiden johdotuksista  
(Eero Ruohola 2017)

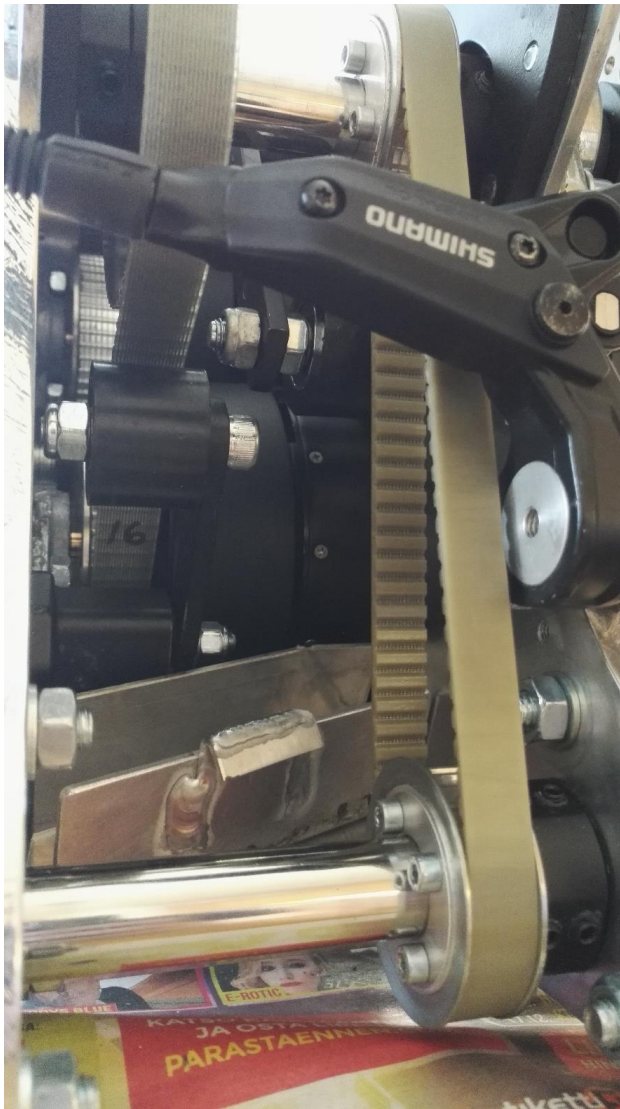
Pääkytkimen piti olla kaksilinjainen, kestää suuria virtoja ja fyysisen koon täytyi olla pieni. Nämä kriteerit täytti Blue sea -merkkinen kytkin, jonka virrankesto on 2 x 300 A jatkuvana (m-Series Mini Dual Circuit Plus™ Battery Switch – Red 2017). Kytkimessä on kolme eri asentoa; off, on ja combine. On-asennossa kytkin kytkee kaksi erillistä piiriä päälle eikä yhdistä niitä, mutta combine-asennossa se yhdistää piirit, jolloin myös piirien jännitetasot tasaantuvat. Kuten kuvasta 6 voidaan huomata, kytkin on suhteessa pieni sen jatkuvan virrankeston suuruuteen. Kuvassa nähdään myös sulakepohjat.



KUVA 6. Päävirtakytkin ja sulakepohjat (Eero Ruohola 2016)

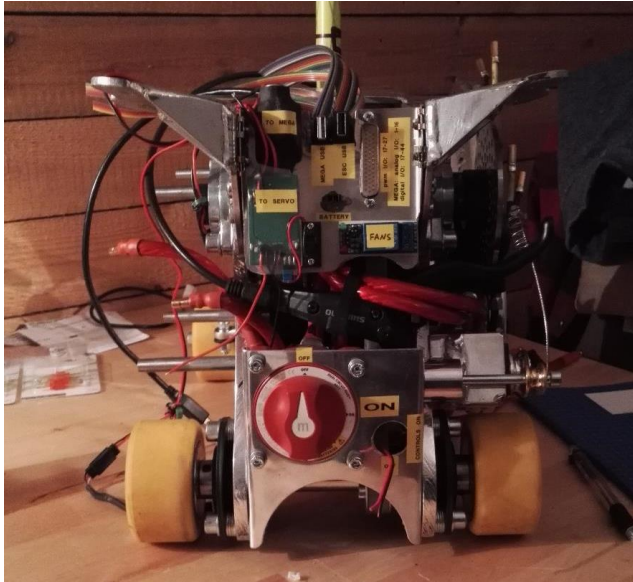
Kytkimeltä johtimet menevät nopeudensäätimen positiivisiin napoihin ja säätimen miinus-johtimet ovat maadoitettu runkoon. Säätimeltä molempien piirien syötöt vaihtuvat kolmivaiheisiksi ja menevät molemmille moottoreille. Moottoreille menevissä johtimissa on värikoodaus ja pyörimissuuntaa saa muutettua napaisuutta vaihtamalla.

Pienjännite- eli ohjausosa saa käyttöjännitteensä perinteisestä lyijygeeliakusta (Kuvio 6). Akku on 12-volttinen ja kapasiteetiltaan 800 mAh. Akku sijaitsee rungon sisällä, moottorien, voimansiirron ja taka-akselin välissä. Kuvassa 7 näkyy tyhjä alumiinista valmistettu akkukotelo, joka sijaitsee moottorien ja taka-akselin välissä. Tilaa oli käytettävissä niin vähän, että akku piti asettaa 45° kulmaan.



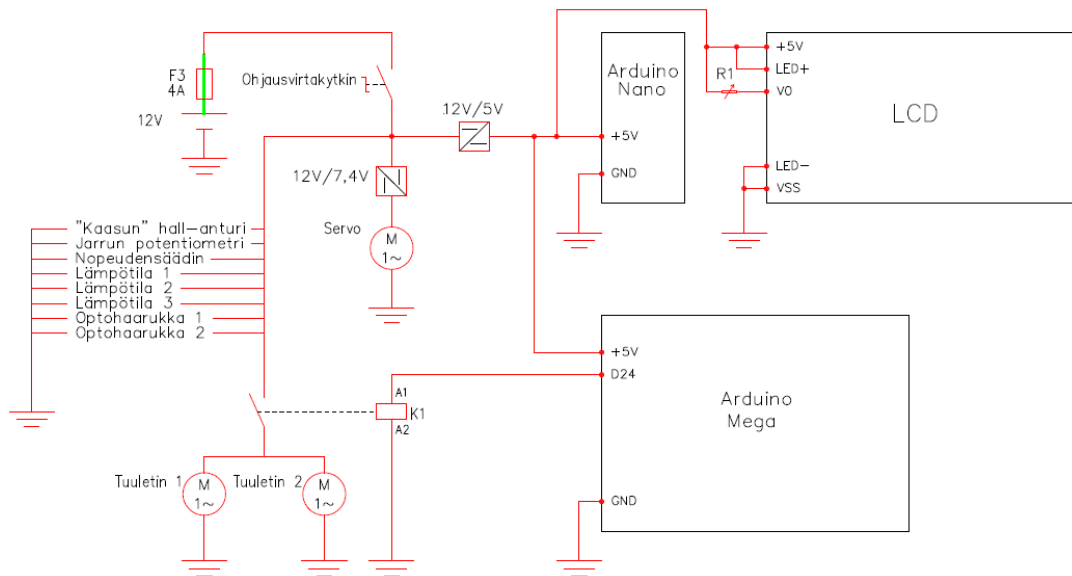
KUVA 7. Rungon välissä olevat komponentit ovat tiiviisti sijoitettu. Taka-akselin edessä näkyy alumiininen akkukotelo (Eero Ruohola 2016)

Akun asennus suunniteltiin sellaiseksi, että akkua ei tarvitse irrottaa latausta varten. Akun pienjännitteen pääkytkimeltä tulee liitin käyttöpaneeliin (Kuva 8), johon liitetään laturin vastaava liitin latauksen ajaksi. Luonnollisesti yhteys muuhun järjestelmään katkaistaan latauksen ajaksi, koska piirin liitin joudutaan irrottamaan laturin liittimen vuoksi. Kuvassa 8 näkyy kaksi paneelia; alempi kytkimille ja ylempi jännitteen alentimille, releelle, D-liittimille ja USB-porteille.



KUVA 8. Kulkuneuvon takaosassa sijaitsevat käyttöpaneelit (Eero Ruohola 2016)

Kuviossa 6 on esitetty ohjauksen jännitepuolen piirikaavio. Ohjauksen jännite ja muut toimilaitteet saavat käyttöjännitteensä rungon väliin asennetusta akusta. Virtapiiri katkeaa automaattisesti latauksen ajaksi, koska virtapiirin liitin korvataan laturin vastaavalla naarasliittimellä.



KUVIO 6. Ohjauksen jännitepuolen piirikaavio (Eero Ruohola 2017)

Tämän liittimen jälkeen on 4 A sulake, jolta lähtee syöttö releen kautta nopeudensäätimen tuulettimille, jännitteen alentimen kautta mikroprosessorille ja toisen erillisen jännitteen alentimen kautta jarrun servolle.

### 4.3.2 Moottorit ja nopeudensäädin

Moottoreiksi valittiin suurimmat mahdolliset RC-lennokkikäyttöön tarkoitetut harjattomat moottorit, jotka mahtuvat olutkorin sisälle. Tässä päädyttiin Turnigyn valmistamaan Rotomax-sarjaan, josta valittiin sarjan suurimmat, eli 150 cc moottorit (Turnigy Rotomax 150 cc size brushless outrunner motor 2017). Kuvassa 9 on esitetty valitut moottorit ja mittakaavana oleva kahvikuppi. Moottorit ovat tehokapasiteettiinsa nähden hyvin pienikokoiset.



KUVA 9. Turnigyn valmistamat moottorit, sekä mittakaavana oleva kahvikuppi (Eero Ruohola 2016)

Nimityksellä 150 cc valmistaja tarkoittaa, että yksi moottori vastaa yhtä 150 cc poltto-moottoria. Alunperin näitä moottoreita piti käyttää vain yhtä kappaletta, mutta riittävän tehon varmistamiseksi päätettiin tuplata tehomäärä. Moottorien valintaan vaikutti myös niiden järjestyksen kiinnitystapa sekä se, että niissä oli kuusijakoinen pulttikiinnitys lennokkikäyttöön tarkoitettua potkuria varten, joka mahdollisti helpon ja luotettavan hihnapyörän kiinnityksen. Koska moottorien alkuperäistarkoitus on kuitenkin pyörittää potkuria, kohdistuu moottorin akseliin alun perin vain pituussuuntaista vetoa. Kun moottorien käyttötarkoitus muuttui ja potkurin tilalle vaihtui hihnapyörä, luonnollisesti aksiaaliset voimat muuttuivat myös. Tästä johtuen moottorien akselien päät tukilaakeroitiin rungon toiseen päähän.

Koska moottoreita oli kaksi ja niillä suuri virran tarve, tarvittiin myös tehokas elektroninen säädin, joka tukee kahta moottoria ja jolla on jaettu ohjaussignaali. Tässä päädyttiin Alien Power Systemsin valmistamaan Dual 300 A -säätimeen (Kuva 10), johon on integroitu kaksi kolmensadan ampeerin säädintä yhteisellä ohjaussignaalilla (Alien 300 A 3-16s car esc hv twin 2017). Säätimen fyysisistä mitoista ei ollut tarkkaa tietoa, joten sen koko asetti erityisiä vaatimuksia sijoituksen suhteen.



KUVA 10. Alien Power System nopeudensäädin ja ohjelmointiin käytettävä USB-johto (Eero Ruohola 2016)

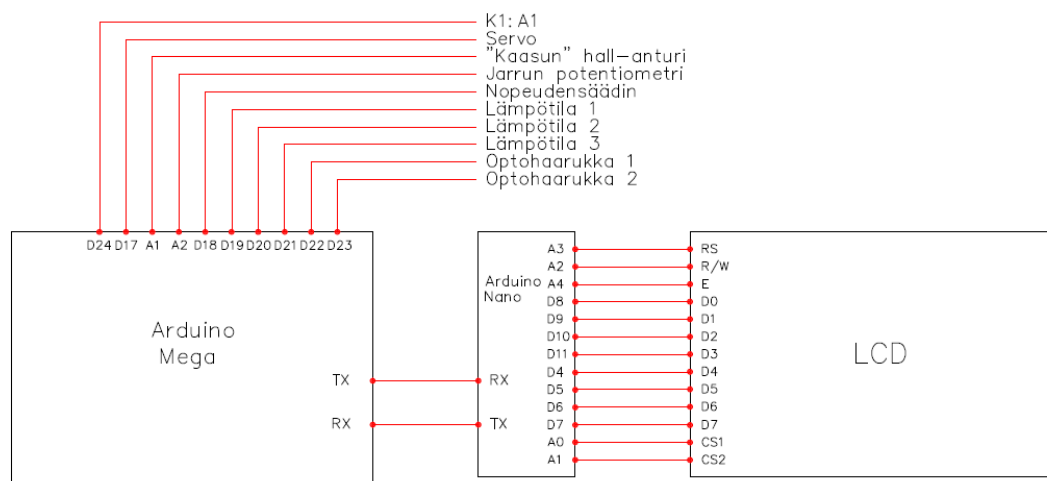
Nopeudensäätimen valitsemisessa päädyttiin RC-käyttöön tarkoitettuun säätimeen, koska se on edullinen, kompakti ja kestää suuria hetkellisiä virtapiikkejä.

Koska säädin luonnollisesti lämpenee, sille valmistettiin jäähdytin, joka releen välityksellä säädetyllä lämpötilan raja-arvolla käynnistää tuuletinyksikön. Koska nopeudensäätimessä on kaksi erillistä säädintä, täytyy ne myös ohjelmoida erikseen. Säätimen ohjelmoinnilla tarkoitetaan parametrien asetusta esimerkiksi kaasun eri säätöjä; lineaarinen / exponentiaalinen / logaritminen kaasutus, moottorin ”sytytysennakko” asteina (kerrottu lisää kappaleessa 3.3) jne. Nämä parametrit voidaan säätää joko ohjelmointikortilla, lähettimellä kaasun asentoa muuttamalla (kaasu täysin auki = kyllä, kaasu täysin kiinni = ei) tai USB-väylän kautta tietokoneella, jolloin tietokoneelle täytyy ladata valmistajan ohjelmisto. Tässä tapauksessa valittiin ohjelmointi tietokoneen kautta, jolloin parametrit

oli helppo säätää. Kun säätimen toinen puoli oli ohjelmoitu ja ladattu muistiin, irrotettiin USB-johdin ja tehtiin sama toiselle säätimelle.

### 4.3.3 Mikro-ohjaimet ja oheislaitteet

Koska tilaa oli hyvin rajallisesti, saatiin Arduino Mega mahtumaan ahtaaseen paikkaan rungon ja penkin väliin. Tämän vuoksi Arduino Megan päällä on ”prototyypilevy”, jolta lähtevät siihen juotetut johtimet ”sähköpaneelissa” olevaan D-liittimeen (Kuva 8). Tämä liitin helpottaa laitteen mahdollista purkamista, koska sähkökomponenttien johtimet eivät ole juottamalla toisissaan kiinni vaan liittimien välityksellä. D-liittimen toiseen pariin tulee johtimet kaikilta käyttölaiteilta kuten erilaisilta antureilta ja kytkimiltä. Kuviossa 7 on kuvattu Arduinojen välinen liitännätapa, sekä toimilaitteiden liitännät.



KUVIO 7. Antureiden ja muiden toimilaitteiden kytkentä mikroprosessorihin (Eero Ruohola 2017)

Yksi liittimelle kytkettävistä komponenteista on potentiometri, eli säätövastus, jolla muutetaan Arduino Megan analogiatuloon tulevaa jännitearvoa nollan ja viiden voltin välillä. Tämä analogiasignaali muutetaan digitaalseksi ja lähetetään jarrun servolle. Potentiometrillä siis säädetään kulkuneuvon jarrua.

Hall-anturin toimintaperiaate on samankaltainen potentiometriin verrattuna, se muuttaa myös jännitetasoa nollan ja viiden voltin välillä, mutta Hall-anturin jännitteenjako ei tapahdu säätövastuksella. Hall-anturi koostuu magneetista ja puolijohde-elementistä, jota

liikutetaan magneettia vasten. Hallin ilmiö on ilmiö, jossa elektronien kulkusuunta muuttuu kun johdin, jossa kulkee sähkövirta, tuodaan magneettikenttään kohtisuorassa kenttään nähden. Käytännössä anturin asentoa muutetaan, jolloin puolijohde-elementti muuttaa asentoa magneetin edessä. Näin elektronit siirtyvät magneettikentän ansiosta puolijohteen toiseen laitaan, josta mitataan jännite-ero vastakkaiseen laitaan nähden. Jännite-ero on kuitenkin niin heikko, että Hall-antureissa on useasti sisäänrakennettu vahvistin. Myös Hall-anturin signaalille tehdään AD-muunnos ja muunnettu signaali lähetetään nopeudensäätimen mikroprosessorille. Hall-anturin mittauksen perusteella säädetään kulku-neuvon nopeutta.

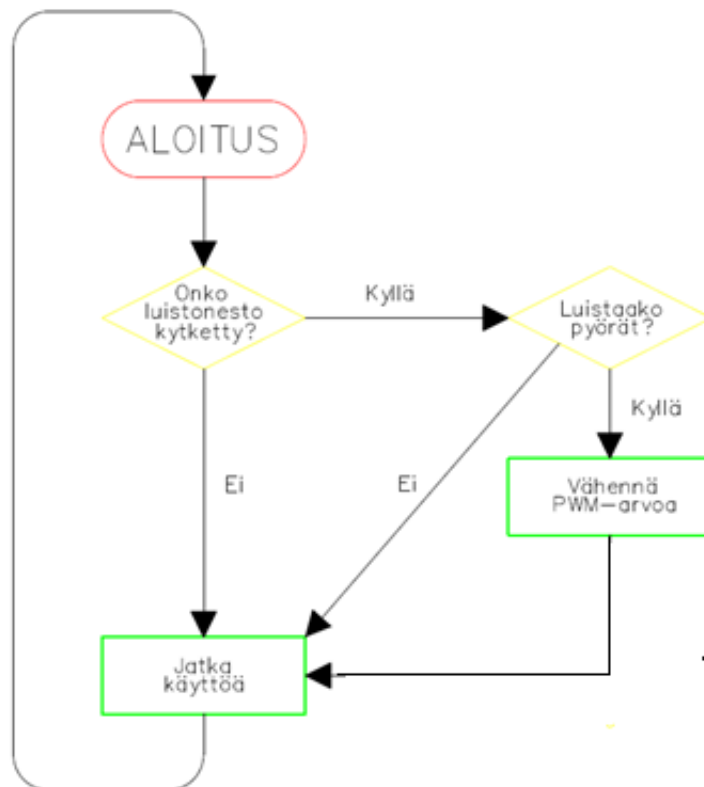
Takajarrua säädetään servon avulla ja toimiakseen servo tarvitsee elektronisen servo-ohjaimen. Tässä tapauksessa servo-ohjaimen korvaa Arduino. Arduino siis vastaanottaa servon asematiedon, vertaa sitä säädettyyn asematietoon ja ohjaa servon haluttuun asentoon pulssin leveyttä muuttamalla.

Optohaarukoita käytetään etu- ja takapyörien välisen nopeuseron mittaamiseen. Optohaarukka toimii infrapuna-allonpituisen valon avulla ja siitä johtuen siinä on lähes olematon hystereesi verrattuna esimerkiksi magneettikytkimeen. Sen takia se sopii hyvin sovelluksiin, joissa tarvitsee mitata erittäin nopeita liikkeitä. Optohaarukan toisella puolella on LED (Light Emitting Diode), joka on jatkuvasti johtavassa tilassa. Tämän valon edestä kulkee niin sanottu laukaisukehä, joka katkoo valon pääsyä haarukan toiselle puolelle valoa tunnistavaan fototransistoriin. Kyseessä oleva NPN-tyyppinen fototransistori saadaan johtavaan tilaan, kun sen kanta-alueelle kohdistetaan tietyn taajuista infrapunasäteilyä, joka saadaan aikaiseksi vastakkaisella puolella olevalla ledillä. Optohaarukalta saadaan pulssin nouseva reuna, kun laukaisukehän välistä pääsee valo siirtymään haarukan toiselle puolelle.

Jännitteen alentimilla eli regulaattoreilla lasketaan käyttöjännite sopivaksi ja pidetään tasaisena Arduinoille ja servolle. Toisella regulaattorilla 12 V:sta 7,4 V:iin ja toisella regulaattorilla 12 V:sta 5 V:iin. Näin saadaan aikaiseksi tasainen jännite joka ei heilahtelee, vaikka regulaattoria syöttävän akun varaus laskisikin (ei kuitenkaan säätimen regulointikyvyn alapuolelle).

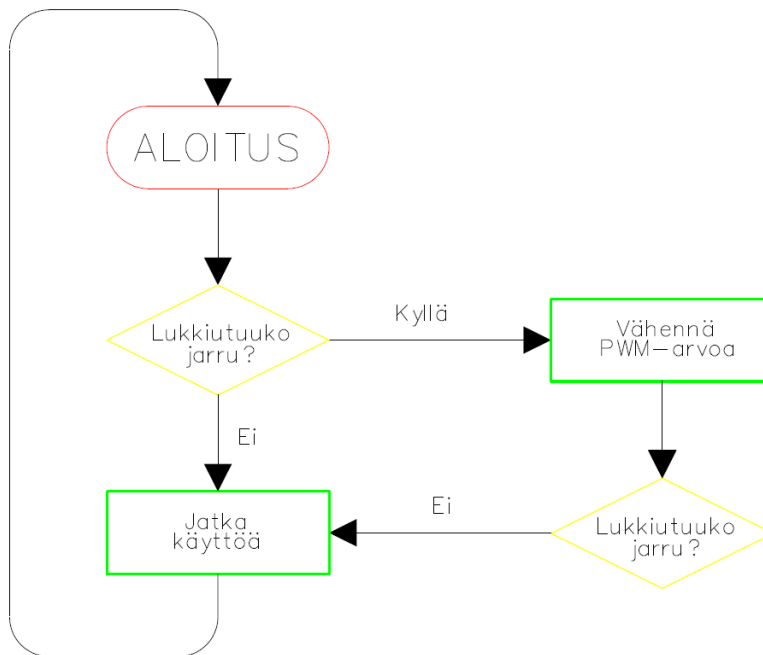
#### 4.4 Ohjelmistotekninen määrittely ja suunnittelu

Kulkuneuvon pääperiaate on, että sillä täytyy päästä eteenpäin ja sillä täytyy pystyä pysähtymään. Tästä johtuen automaatiojärjestelmä rakentuu suurilta osin kaasun Hall-anturilta ja jarrun potentiometriltä Arduino Megalle tuleviin jänniteviesteihin eli analogiasignaaleihin, jolle Arduino Mega tekee AD-muunnoksen. Arduino lähettää muunnetun digitaalisygnalin eli pulssin leveyden nopeudensäätimen prosessorille ja takajarrun servolle. Tämä on siis ajoneuvon automaatiojärjestelmän runko. Molemmat niistä toimivat samalla pääperiaatteella: etu- ja takapyörien välistä nopeuseroa seurataan ja nopeuseron ilmetessä mikroprosessori päättää joko rajoittaa kaasun määrää tai jarruttaa, riippuen siitä onko nopeusero suurempi vai pienempi kuin 1:1. Kuvio 8 antaa käsityksen siitä, miten luistoneston tässä tapauksessa kuuluisi toimia.



KUVIO 8. Automaatiojärjestelmän luistoneston vuokaavio (Eero Ruohola 2017)

ABS-jarrujärjestelmän toimintaperiaate on tässä tapauksessa hieman yksinkertaisempi, koska sitä ei saa ikinä otettua pois toiminnasta, kuten luistoneston. Kuviossa 9 näkyy ABS-jarrujärjestelmän ohjelmallinen toimintaperiaate.



KUVIO 9. Automaatiojärjestelmän ABS-jarrujärjestelmän vuokaavio  
(Eero Ruohola 2017)

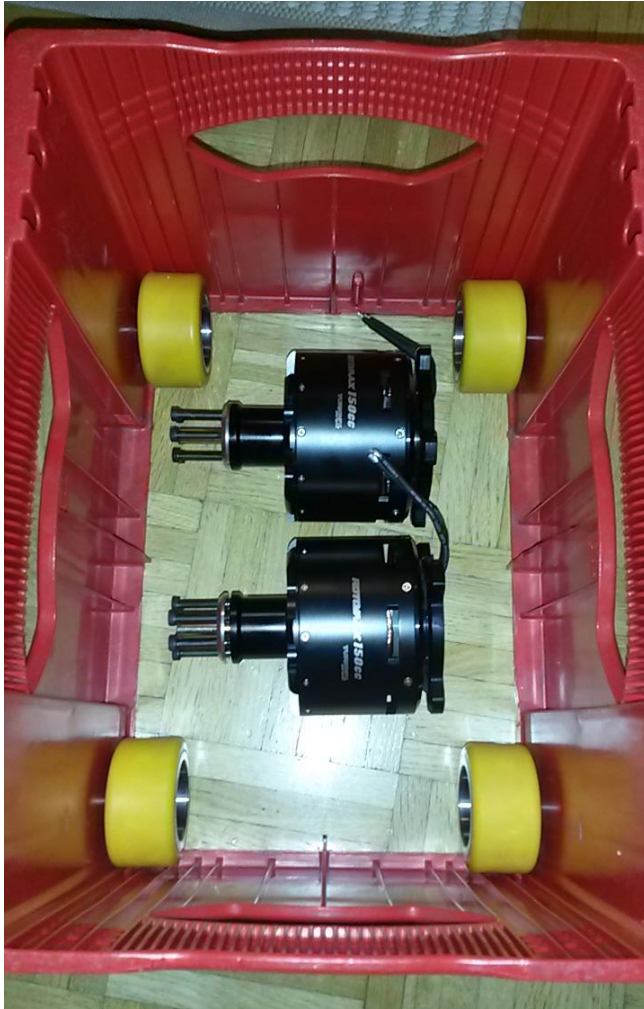
Nopeuseroa valvotaan kahdella optohaarukalla, yksi etupyörillä ja yksi takapyörillä. Pyöriin on kiinnitetty 3D-tulostettu laukaisukehä, joka saa aikaan optohaarukassa pulssin nousevan ja laskevan reunan. Näitä pulsseja mikroprosessori vertailee ja havaittuaan, että takapyöriltä tulee enemmän pulsseja kuin etupyöriltä, se rajoittaa kaasun pulssinleveyden arvoa vaikka ajaja pitäisi kaasun täysillä. Alennettu pulssinleveys lähetetään nopeudensäätimen prosessorille ja säädin alentaa moottorien nopeutta. Nopeuden kasvaessa tarpeeksi, prosessori huomaa etu- ja takapyörien välisen pulssin olevan taas sama, jolloin kaasun asetusarvo välitetään sellaisenaan nopeudensäätimelle eikä mikroprosessorin ohjelma rajoita sen pulssinleveyttä. ABS-jarrutuksessa periaate on sama, mutta takapyörien nopeuden laskiessa etupyöriin verrattuna, rajoittaa prosessori jarrukahvalta tulevaa pulssinleveyttä, joka estää takarenkaiden lukkiutumisen. Tämä on tärkeä toiminto ihmisen reaktioajan ollessa keskimäärin sekunnin verran, kun taas mikroprosessori vertailee takapyörien tilaa kymmeniä kertoja sekunnissa.

Työssä päädyttiin UART-tasoiseen TTL-väylään, koska se on yksinkertainen ja tarvitsee vain kolme johdinta, TX, RX ja GND (Kuvio 7). Joissain tapauksissa voidaan pärjätä jopa vain kahdella johtimella, jos sarjaliikenneväylään liitetyn laitteen tarvitsee vain vastaanottaa dataa, mutta ei lähettää mitään takaisin. Silloin tarvitaan vain TX ja GND johtimet. Tässä työssä Arduino Mega lähettää LCD-näyttöä ohjaavalle Arduino Nanolle tulostettavaa dataa ajoprosessin aikana syntyvästä datasta, eikä Nanon siis tarvitse kommunikoida

Megan kanssa ollenkaan (Graphic LCD 128x64 STN LED Backlight 2017). Siksi TX/RX sarjaliikenneväylän käyttö on hyvä vaihtoehto. On kuitenkin huomioitava, että lähettävän laitteen TX-liitin on aina kytkettävä vastaanottavan laitteen RX-liittimeen ja toisinpäin, eli ristiin. Muuten tiedonsiirto ei onnistu. Lisäksi tulee huomioida, että kahden dataa lähettävän laitteen TX-johtimia ei saa kytkeä rinnakkain yhdelle laitteelle sen RX-liitäntään. Tästä aiheutuu mahdollinen päällekkäinen tiedonsiirto joka voi pahimmassa tapauksessa johtaa lähettävien laitteiden TX-liitäntöjen tuhoutumiseen (Serial communication 2014).

#### **4.5 Mekaaninen määrittely ja suunnittelu**

Rakentamiseen käytettävissä oleva tila oli 380 mm x 260 mm x 250 mm. Näiden mittojen yli runko tai mekaniikka ei saa tulla, koska muuten olutkori ei sovi paikoilleen, eikä kuluneuvo siten täytä sääntömääräyksiä. Rungon suunnittelu aloitettiin kuvan 11 mukaisesti. Pyörät ja moottorit asetettiin korin sisälle, jotta voitiin miettiä vaihtoehtoja erilaisten runkoratkaisujen välillä.



KUVA 11. Rungon muodon hahmottelua sommittelemalla moottoreita ja pyöriä korin sisälle (Eero Ruohola 2016)

Rungon suunnittelu aloitetaan laittamalla pyörät korin sisälle, jolloin voidaan mitata akseli- ja raideväli. Kun nämä mitat ovat tiedossa, voidaan sovittaa moottorit korin sisälle sopiville paikoille, jolloin saadaan selville moottorikiinnikkeiden sivuttaissuuntainen etäisyys runkoon nähden. Koska rungosta tehdään ”laatikkomainen”, voidaan nyt alkaa sovittaa moottoreita korkeussuunnassa siten, että vetohihna kulkisi saman pituiselta matkalta molempien moottorien hihnapyörillä. Molempien moottorien tarkkojen paikkojen ollessa määritetty, katsotaan että hihnan kiristäjät mahtuvat hihnojen ja rungon väliin. Nämä mitat määrittelevät rungon laakerointipisteet, joka on ensimmäinen osa alettaessa valmistaa runkoa.

## 4.6 Testaussuunnitelma

Ensimmäinen testaus suoritetaan kun runko on saatu pääosin valmiiksi. Akselistojen, eturipustuksien, ohjauksen komponenttien ja pyörien ollessa paikoillaan. Tällöin kulkuneuvo on siinä vaiheessa, että sillä voidaan rullata alamäkeen ja testata ajogeometrian toimivuutta, jolloin selviää täytyykö geometriaa parantaa.

Seuraava testaus järjestetään, kun sähkömoottorit on kytketty paikoilleen ja voimansiirto takapyörille on valmis. Tällöin päästään testaamaan voimansiirron komponenttien toimintaa, kuten hihnojen kiristäjiä ja ohjureita, sekä voidaan kokeilla ensimmäistä kertaa pyörittää takarenkaita moottorien avulla, jotta nähdään pysyvätkö hihnat paikoillaan. Kolmannessa testauksessa kokeillaan päällisin puolin valmista ajoneuvoa, jossa toimii hyvin pelkistetty elektroniikka, eli vain jarru ja kaasu. Näin päästään testaamaan kulkuneuvon toimintaa ensimmäistä kertaa. Tässä testauksessa selvitetään, tarvitseeko ajogeometriaan tehdä vielä lisäparannuksia, toimivatko kaikki komponentit yhdessä toistensa kanssa ja olisiko laitteessa luotettavuus ongelmia tai vikoja jotka täytyisi korjata. Kulkuneuvon ajetaan siis muutama testikilometri, jotta voitaisiin olla varmoja kulkuneuvon oikeanlaisesta toiminnasta ja voitaisiin jatkaa seuraavaan vaiheeseen.

Viimeistä testausta varten rakennetaan ajoneuvolle testauspenkki, jossa takapyörien rullat olisivat yhteydessä etupyörien rulliin niin, että etupyörät pyörisivät samaan tahtiin takapyörien kanssa. Näin voidaan simuloida realistista ajotapahtumaa, sekä testata ja säätää luistonestoa, ABS-jarrua ja moottorien ottamia virtoja erilaisissa kiihdytyksissä. Tämä helpottaa testejä huomattavasti, koska testit voidaan suorittaa puhtaissa olosuhteissa sisätiloissa. Näin laitteen toimintaa on helpompi tarkastella kuin ajossa, jolloin jouduttaisiin käyttämään videokameraa takapyörien lukkiutumisen tai luistamisen todentamiseen.

## 5 AJONEUVON KOKOAMINEN JA TESTIT

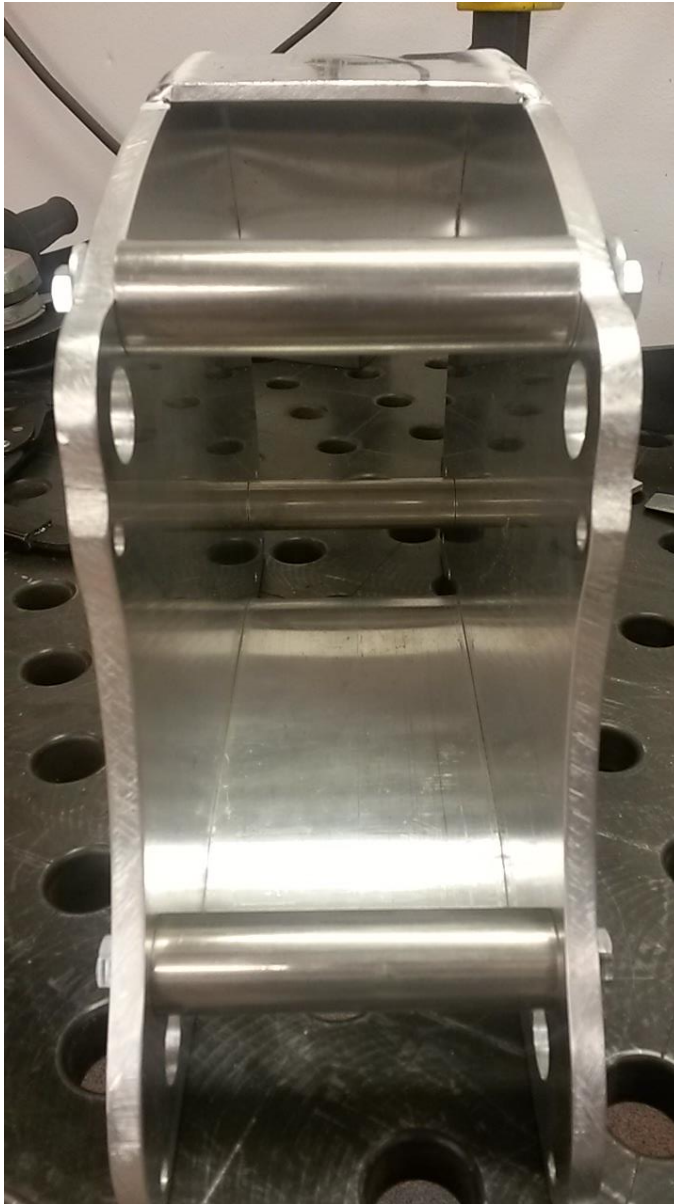
Projekti alkoi syksyllä 2015 olutkorin hankkimisella. Kori on kaikkein olennaisin osa kulkuneuvossa, koska se määrittelee rungon mitat, akselivälin, raideleveyden ja tekniikan, joka korin sisälle tulee. Korin hankinnan jälkeen ostettiin sopivat pyörät, joiksi valittiin Trukkitarvike Oy:n pienet polyuretaanipyörät, joiden mitat ovat 40mm x 75mm. Pyörät hankittiin seuraavaksi, koska ne määrittelevät rungon leveyden. Rungon leveys saadaan mittaamalla yhteen molempien puolien pyörien ja eturipustuksien leveys ja vähentämällä se korin sisäleveydestä. Tämän jälkeen tilattiin Hobbyking-nimisestä yrityksestä moottorit. Päädyttiin kahteen 10 kW harjattomaan RC-lennokin moottoriin, koska ne ovat hinnaltaan edullisia ja pienikokoisia. Tämä vaikutti myös rungon valmistamiseen, koska runko myötäilee suurilta osin moottorin muotoja.

Moottorien saavuttua aloitettiin rungon valmistus. Rungon materiaalissa päädyttiin 8 mm:n vahvuiseen alumiinilevyyn, joka hitsattiin lyhyeltä matkalta yhteen, jonka jälkeen piirrettiin sapluuna yhdelle levyille. Levyt leikattiin pistosahalla sapluunan mukaiseen muotoon ja reunat viimeisteltiin nauhahiomakoneella ja viilalla. Tämän jälkeen merkittiin laakereiden ja etuakseliston kiinnityspisteiden reiät ja porattiin ne pylväsporakoneella, kun levyt olivat vielä hitsattuna toisiinsa kiinni. Näin saatiin varmistettua, että akseliston kiinnitys on symmetrinen. Sen jälkeen hitsaussaumot irrotettiin ja saatiin kaksi identtistä runkolevyä reikineen, jotka jäivät odottamaan väliin tulevaa alumiinilevyä. Kuvassa 12 näkyy valmiit runkolevyt reikien poraamisen ja muotoilun jälkeen.



KUVA 12. Rungon levyt irrotettuna toisistaan reikien porauksen ja levyjen muotoilun jälkeen (Eero Ruohola 2016)

Rungosta täytyi saada symmetrinen, joten runkolevyjen väliin sorvattiin 100 mm pituiset metalliholkit, joiden avulla runkolevyt kiinnitettiin toisiinsa hitsauksen ajaksi kuvan 13 mukaisesti. Näin pystyttiin välttämään muodonmuutokset hitsauksen aikana, ja saatiin runko pysymään halutuissa mitoissa.



KUVA 13. Teräsholkit jotka estävät hitsauksen aikana syntyvät muodonmuutokset  
(Eero Ruohola 2016)

Kun suurin osa rungosta oli hitsattu, täytyi runkoon hitsata ovaalin muotoinen levy moottoreiden kiinnitystä varten. Tämä sen vuoksi, että moottorit ovat runkoa leveämmät ja muussa tapauksessa moottoreita olisi ollut vaikea tukilaakeroida runkoon.

Rungon ollessa kokonaan hitsattu, valmistettiin eturipustukset ja taka-akselisto, jotta kulkuneuvo saatiin renkaalleen. Kun kulkuneuvo oli renkaillaan, tehtiin ohjaus valmiiksi. Ohjauspylvään ala- ja yläpää on laakeroitu runkoon nylon-puslien avulla, jota on helppo työstää ja se kestää hyvin kulutusta. Ohjauspylväs tehtiin komposiittiputkesta, joka on kiinnitetty ohjaustangon adapteriin kaksikomponenttisella epoksiliimalla.

Rullaavan rungon valmistuttua ryhdyttiin valmistamaan kiinteää taka-akselia ja ensiö- sekä toisiovetoa. Molemmat moottorit käyttävät yhteistä teräspunosvahvisteista hammashihnaa, joka pyörittää jarru-akselia. Tämä on siis ensiöveto. Toisioveto kulkee tältä jarruakselilta taka-akselille ja pyörittää takapyöriä. Kulkuneuvossa on siis kaksi voimansiirtoon käytettävää hammashihnaa ja niille molemmille omat hihnan kiristäjät. Kuvassa 14 on rullaava runko ja toimiva voimansiirto.



KUVA 14. Koottu voimansiirto (Eero Ruohola 2016)

Jarrulevyllä päätettiin tehdä erillinen akselisto, koska renkaat ovat niin pienet, ettei jarrulevy olisi mahtunut taka-akselille. Jarrulevy on käsityönä valmistettu ja puristin polkupyörän nestetoiminen Shimano. Kuvassa 15 tyhjä olutkori on sovitettuna valmiin rungon ympärille.



KUVA 15. Korin sopivuuden testausta valmiin rungon ympärille (Eero Ruohola 2016)

Akkukotelo hitsattiin alumiinista ja se kiinnitetään laitteen vasemmalle puolelle. Kotelo on niin suuri kuin olutkori ja muu tekniikka antoi periksi, sinne mahtuu maksimissaan neljä kappaletta 8000 mAh kuusikennoisia akkuja.

Kuvassa 16 on teknisesti valmis kulkuneuvo. Ensimmäinen koeajo suoritettiin koulun ruokalan aulassa. Koeajo suoritettiin ilman konepeittoa, jotta voitiin seurata komponenttien toimivuutta ja mahdollisia vikatilanteita.



KUVA 16. Ensimmäinen ajotesti ja kiihdytysjäljet lattiassa (Eero Ruohola 2016)

## 6 POHDINTA

Työn aikana vastoinkäymisiä esiintyi vähän. Kulkuneuvon rakentaminen onnistui hyvin ja siitä tuli suunnitelmien mukainen. Sähköistyksen suunnittelussa tarvitsin hieman ulkoista konsultaatiota. Sain hyviä vinkkejä sekä tarvittaessa apua muunmuassa juottamiseen.

Projekti oli suuri. En olisi uskonut, että ensimmäisen koeajon koittaessa kaikki toimi niin kuin piti. Kaikki komponentit ovat pysyneet ehjinä sekä kestäneet suuria nopeuksia ja rasituksia. Näistä seikoista voidaan päätellä, että suunnittelu onnistui hyvin.

Aiheen jatkojalostaminen kuitenkin kiinnostaa suuresti ja sen vuoksi opinnäytetyön rakentamisen aikana olen saanut lukuisia kehitysideoita projektin suhteen. Nämä jatkokehitysideat koskevat varsinkin kulkuneuvon teknisen rakenteen yksinkertaistamista ja siirtymistä kevyempiin materiaaleihin, kuten hiilikuituun tai 3D-tulosteisiin. Yksi suurimmista ideoista onkin, jos tulevaisuudessa kulkuneuvon rungon ja joitain muitakin osia voisi tuottaa nopeasti ja edullisesti 3D-tulostamalla, jossa mahdollisuudet ovat rajattomat.

Toinen suuri jatkojalostusidea ovat moottorit. Nykyisellään käytössä olevat kaksi suurta moottoria vievät suuren osan käytössä olevasta tilasta epätehokkaasti. Tulevaisuuden kannalta olisikin siis järkevintä integroida moottorit pyörien sisälle. Näin välttyttäisiin pito-ongelmilta, lisäksi moottoreilla olisi hyvä vääntömomentti ja ne veisivät mahdollisimman vähän käytettävissä olevaa tilaa. Näin välttyttäisiin myös ylimääräisiltä voimansiirron komponenteilta kuten hihnoilta, hihnapyöriltä, hihnan kiristäjiltä ja laakereilta. Tällöin myös moottorien pienenemisen johdosta tehon määrä laskee, jolloin myös nopeuden säätimeltä ja akuilta vaaditaan vähemmän. Myös jarrut voitaisiin toteuttaa sähköisesti, jolloin välttyttäisiin kokonaan fyysiseltä jarrulta ja kuluvilta osilta.

Kaikki tämä lisätila voitaisiin siis hyödyntää esimerkiksi akuston kapasiteetin kasvattamiseen, jolloin ajomatka saataisiin moninkertaistettua.

## LÄHTEET

Meteoreisengummioxid. Idea. Kulkuneuvon synty. Luettu 4.3.2017

<http://www.meteoreisengummioxid.de/>

Fahrende Bierkiste – Youtube 2013: Bierkistenrennen – Testfahrt – Bierkistenkart. Kuvakaappaus Bierkisten koeajo-videosta. Youtube 2013. Katsottu 4.4.2017.

<https://www.youtube.com/watch?v=eh7DnlaJgd8>

Energy Matters. Sähkö- ja polttomoottorin erot. Sähkömoottorin tehokkuus. Luettu 17.2.2017

<https://matter2energy.wordpress.com/2013/02/22/wells-to-wheels-electric-car-efficiency/>

Hohenthanner. Olutkorikilpailu. Säännöt. Luettu 4.3.2017

<http://www.neu.hohenthanner.de/brauerei/6-bierkisten-rennen.html>

Hohenthanner. Olutkorikilpailu. Osallistumisohjeet. Katsottu 4.4.2017

<http://www.neu.hohenthanner.de/brauerei/6-bierkisten-rennen.html>

Tapio Pihl. 2011. Formula student electric moottorin valinta. Luettu 17.2.2017

<http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/34118/insinorityo%20Tapio%20Pihl.pdf?sequence=1>

Ourdev. Microchip. Harjattoman DC-moottorin perusteet. Luettu 2.4.2017

[http://download.ourdev.cn/bbs\\_upload782111/files\\_11/ourdev\\_469172.pdf](http://download.ourdev.cn/bbs_upload782111/files_11/ourdev_469172.pdf)

Rreaction. Teknologia tietotaitoa. Moottorin ajoitus selitetty. Luettu 17.2.2017

<http://www.rccaraction.com/its-about-time-how-to-understand-brushless-motor-timing/>

Juha Koski. 2010. Harjattoman DC-moottorin ohjaus. Luettu 2.4.2017

[https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/16698/Koski\\_Juha.pdf?sequence=1](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/16698/Koski_Juha.pdf?sequence=1)

Endless Sphere. RC-nopeudensäädin vs. sähköpyörän kontrolleri. Elektronisten nopeudensäätimien eroavaisuuksia. Luettu 17.2.2017

<https://endless-sphere.com/forums/viewtopic.php?f=2&t=23882>

Angelfire. Akkujen testausdata. Kuormituskäyrät. Katsottu 9.3.2017

[http://access.time.angelfire.com/battery\\_test\\_data\\_01.html](http://access.time.angelfire.com/battery_test_data_01.html)

Flitetest. Akkujen paloturvallisuus. Turvallisin säilytystapa. Katsottu 9.3.2017

<http://www.flitetest.com/articles/lipo-battery-bunker>

Rogers Hobby Center. Ymmärrä LiPo-akkuja. Perusteet ja turvallisuus. Luettu 9.3.2017

<https://rogershobbycenter.com/lipoguide/>

Arduino. Yleiskatsaus. Arduino Mega 2560. Luettu 12.3.2017

<https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>

HW Kitchen. GSM-pelikenttä. GSM-kilpi Arduinoon. Katsottu 12.3.2017

<http://www.hwkitchen.com/products/gsm-playground/>

Banzi, M. 2011. Arduino perusteista hallintaan. Luettu 13.3.2017

Sparkfun. Serial communication. Sarja- ja rinnakkaisdatan tiedonsiirto. Katsottu 12.3.2017

<http://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-communication>

Texas Instruments. MAX232. UART toimintaperiaate. Luettu 3.4.2017

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf>

Yle. Kioski. Testaa reaktionopeutesi. Luettu 3.3.2017

<http://erikoiset.kioski.yle.fi/jutut/2015/07/reaktiotesti/>

Blue Sea. Kytkimet. Kaksikanavainen kytkin. Katsottu 4.4.2017

[https://www.blueseas.com/products/6011/m-Series\\_Mini\\_Dual\\_Circuit\\_Plus\\_Battery\\_Switch\\_-\\_Red](https://www.blueseas.com/products/6011/m-Series_Mini_Dual_Circuit_Plus_Battery_Switch_-_Red)

Hobby King. Harjattomat sähkömoottorit. Turnigy Rotomax. Katsottu 4.4.2017

[https://hobbyking.com/en\\_us/turnigy-rotomax-150cc-size-brushless-outrunner-motor.html?\\_\\_store=en\\_us](https://hobbyking.com/en_us/turnigy-rotomax-150cc-size-brushless-outrunner-motor.html?__store=en_us)

Alien Power Systems. Elektroniset nopeudensäätimet. Nopeudensäätimet autoille. Katsottu 4.4.2017

<http://alienpowersystem.com/shop/esc/alien-300a-3-16s-car-esc-hv-twin/>

Sparkfun. Näytöt. LCD 128x64. Katsottu 4.4.2017

<https://www.sparkfun.com/products/710>

Sparkfun. Serial communication. Sarja- ja rinnakkaisdatan tiedonsiirto. Luettu 12.3.2017

<https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-communication>