

Opinnäytetyö (AMK)

Tieto- ja viestintäteknikka

2020

Mikko Samuelsson

LITIUMKENNOJEN KÄYTTÄYTYMINEN ERI LÄMPÖTILOISSA

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikka ja tietoliikenne

2020 | 69 sivua, 26 liitesivua

Mikko Samuelsson

LITIUMKENNOJEN KÄYTTÄYTYMINEN ERI LÄMPÖTILOISSA

Litiumpohjaisten kennojen tutkiminen on erityisen tärkeää, koska litiumioniakut ovat yksi eniten käytetyimmistä akkutyypeistä nykypäivänä.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia litiumkennojen käyttäytymistä eri varaustasoilla ja erilaisissa lämpötiloissa. Tavoitteena oli selvittää miten lämpötila vaikuttaa kennon toimintaan ja kuntoon. Akkuja on pystyttävä käyttämään kaikissa mahdollisissa tilanteissa eli myös monessa eri lämpötilassa, joten kennojen käyttäytymisen selvittäminen ja ymmärtäminen on erityisen tärkeää.

Opinnäytetyöhön valittiin kolme erilaista kemiallista koostumusta sisältävää kennoa. Kennot edustavat kaikkein suosituimpia kemioita. Valitut kennot ovat litiumtitanaatti, litium-rautafosfaatti ja litium-mangaanioksidi.

Mittaukset suoritettiin kennoille kolmessa eri lämpötilassa. Ensin mitattiin kennot, jotka olivat huoneenlämmössä, seuraavaksi kennot lämmitettiin 60 °C:n ja lopuksi kennot jäähdytettiin -20 °C:n.

Kennojen kemialliset ominaisuudet muuttuivat huomattavasti viilennettynä, jolloin havaittiin myös selkeää kapasiteetin menetystä osassa kennoista. Lämmitetyissä kennoissa tapahtui myös huomattavaa muutosta kemiallisissa ominaisuuksissa.

Akkujen lämpötilan hallitseminen on tutkimuksen perusteella erittäin tärkeää, koska työssä selvitetty lämpötilan muutokset vaikuttavat kennojen kemiallisiin ominaisuuksiin suuresti. Näiden tulosten perusteella odotettavissa on kennojen ominaisuuksien huomattavasti nopeampaa heikentymistä käytettäessä kennoja näissä lämpötiloissa.

ASIASANAT:

Litiumioniakut, Litium-ioni, Li-Ion, Akkukkenno

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree programme

2020 | 69, 26

Mikko Samuelsson

BEHAVIOUR OF LITHIUM-CELLS IN DIFFERENT TEMPERATURES

Lithium-based batteries are one of the most used battery types today, so it is very important subject to study how they behave in different conditions.

The purpose of this thesis was to investigate how lithium-cell behaviour changes in different temperatures and how quality and functionality is affected.

Three different cell chemistries were chosen for this thesis. These cells were from a lithium-titanite battery, a lithium iron phosphate battery and a lithium ion manganese oxide battery.

The measurements were conducted in room temperature, at -20°C and at 60°C .

The results showed significant changes in the electrochemical quality of the cells compared to cells in room temperature. These results show it is extremely important to keep operating temperatures at normal level to keep cell quality at maximum level.

KEYWORDS:

lithium-ion batteries, Lithium-ion, Li-ion, battery cell

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET	1
1 JOHDANTO	1
2 LITIUMIONIKENNOT	3
2.1 Taustaa	3
2.2 Kennotyypit ja kemiat	4
2.3 Impedanssi	6
3 MITTAUSTEN VALMISTELU	7
3.1 Mittausjärjestelyt	7
3.2 Kennotesteri	8
3.3 Impedanssimittari	9
4 MITTAUKSET	11
4.1 Lataus huoneenlämmössä	11
4.2 Impedanssimittaukset	14
4.3 Purku huoneenlämmössä	16
4.4 Purku lämpimässä tilassa	18
4.5 Purku kylmässä tilassa	21
5 KENNOJEN VERTAILU ERI LÄMPÖILOISSA	23
5.1 LTO-kennojen vertailu ja pohdinnat	23
5.2 LFP-kennojen vertailu ja pohdinnat	26
5.3 LMO-kennojen vertailu ja pohdinnat	29
6 YHTEENVETO	34
LÄHTEET	36

LIITTEET

- Liite 1. LTO-kenno: purku huoneenlämmössä
- Liite 2. LFP-kenno: purku huoneenlämmössä
- Liite 3. LMO-kenno: purku huoneenlämmössä
- Liite 4. LTO-kenno: purku 60 °C:ssa
- Liite 5. LFP-kenno: purku 60 °C:ssa
- Liite 6. LMO-kenno: purku 60 °C:ssa
- Liite 7. LTO-kenno: purku -20 °C:ssa
- Liite 8. LFP-kenno: purku -20 °C:ssa
- Liite 9. LMO-kenno: purku -20 °C:ssa

KÄYTETYT LYHENTEET

Li-ion	Litiumioni
LFP	Litiumrauta-fosfaatti LiFePO_4
LMO	Litiummangaanioksididi LiMn_2O_4
LTO	Litiumtitanaatti
NMC	Nikkeli-mangaani-koboltti
SOH	akun/kennon kunto verrattuna alkuperäisen kennoon (State Of Health)
SOC	akun/kennon varaustaso verrattuna alkuperäisen kennoon (State of Charge)

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on litiumkennojen käyttäytyminen eri lämpötiloissa. Työn tavoitteena on selvittää miten lämpötila vaikuttaa eri varaustasoilla olevaan litiumkennoon. Vaikutuksia kemiallisiin ominaisuuksiin selvitettiin mittaamalla kennojen impedanssi eri lämpötiloissa sekä täytenä että eri varaustasoilla olevista kennoista.

Litiumkennojen tutkiminen ja ominaisuuksien ymmärtäminen on erityisen tärkeää, koska litiumioniakut ovat nykyään yksi yleisimmistä akkutyypeistä. Tulevaisuudessa lisääntyvä sähkökäyttöisten autojen määrä ja erilaiset sähkön varastointi tarpeet tulevat vain lisääntymään ja kasvattamaan myös litiumkennojen tarvetta suuresti. Vaikka ominaisuuksiltaan parempia vaihtoehtoja litiumin käyttöön on jo tutkittavana ja testattavana, niin käytännössä litiumpohjaiset akut tulevat olemaan arkipäivää vielä pitkälle tulevaisuuteen.

Akkuteknologiat ovat olleet jo pitkään erittäin kiinnostava tutkimuksen kohde, ja kirjallisuutta aiheesta löytyy suuri määrä. Opinnäytetyössä käsitellään akkuteknologioista litiumpohjaisia akkuja. Tässä työssä teoriaosuuden käsittelyyn on haettu tukea mm. kirjasta *Rechargeable lithium batteries : from fundamentals to applications* [1] perusasioihin sekä syvemmin kirjasta *Lithium-ion batteries : advances and applications* [2]. Litiumakuteknologia on myös erittäin suosittu tutkimuksen aihe ja on sitä ollut jo pitkän aikaa, kirjallisuutta on julkaistu runsaasti ja uusia tutkimuksia julkaistaan koko ajan lisää [3][4]. Suurimpana tutkimusta lisäävänä tekijänä on autoteollisuuden käynnissä oleva siirtyminen sähkökäyttöisyyteen, artikkelissa *The Development and Future of Lithium Ion Batteries* [5] kuvataan litiumin käyttöä ja tulevaisuuden näkymiä juuri autojen näkökulmasta. Litiumpohjaiset tekniikat kuitenkin kehittyvät erittäin nopeasti, eikä kaikki vanhemmat tutkimukset välttämättä enää ole ajankohtaisia yksityiskohdiltaan, koska käytettävät materiaalit kehittyvät ja vaihtuvat [2 s.7].

Akkuteknologioiden kohdalla kehityskohteita ovat parannukset turvallisuuteen, lataus- ja purkunopeuteen, kapasiteettiin ja kestävyysyteen sekä hinnan alentaminen [6]. Li-ion akut ovat kuitenkin käytännössä paras vaihtoehto täyttämään kaikki akuilta nykyisin vaadittavat ominaisuudet. Litiumin haittoihin ja riskeihin ei tässä työssä paneuduta, koska aihealue on erittäin laajasti tutkittua Esko Joupin 2019 julkaistussa opinnäytetyössä [7].

Tähän opinnäytetyöhön valittiin kolme erilaista kemialla sisältävää litiumkennoa. Tutkittavat kennot ovat yleisimpiä käytössä olevia kennoja, ja niitä käytetään sekä pienissä työkalujen akuissa että suurissa autojen akuissa ja kaikessa siinä välillä. Valitut kennot ovat litiumtitanaatti (LTO), litium-mangaanioksidi (LMO) ja litium-rautafosfaatti (LFP).

Käytännön mittaukset tehtiin normaalissa huoneenlämmössä sekä kennojen käyttöaluiden ääripäissä eli lämpötiloissa -20 °C ja 60 °C . Mittausten tuloksien tulkinnassa keskityttiin pääasiassa impedanssin mittauksiin. Litium-akkujen lataamista ja purkamista on tutkittu kattavasti useissa eri opinnäytetöissä, kuten Roger Rukundon 2017 [8] ja Toni Monosen 2018 [9] opinnäytetöissä, joten tämä osa mittaustuloksista jätettiin käsittelemättä tässä opinnäytetyössä tarkemmin, vaikka kattavasti saatiin myös aiheeseen liittyvää mittaustietoa.

2 LITIUMIONIKENNOT

2.1 Taustaa

Uudelleen ladattavat litiumioniakut tulivat kaupalliseen käyttöön 1990-luvun alussa, kennojen kehitys oli kuitenkin aloitettu jo 1980-luvun alkupuolella [10]. Litiumia oli jo käytetty tuossa vaiheessa paristoissa muutama vuosikymmen. Litiumioniakun toi ensimmäisenä markkinoille vuonna 1991 Sony Corporation ja tämän jälkeen litiumionikennojen kehitys pääsi kunnolla alkuun [11].

Aluksi litiumioniakut tulivat käyttöön matkapuhelimiin, koska niillä oli erinomainen energiatiheys, eli käyttöaika suhteessa akun kokoon oli erinomainen, verrattuna aiempiin akkuteknologioihin. Matkapuhelimista käyttö laajeni nopeasti myös kannettaviin tietokoneisiin ja siitä sitten langattomuuden lisääntyessä kaikkialle mobiililaitteisiin.

Nykyään yhä suuremmassa määrin litiumioniakkuja käytetään myös suuremmassa koossa eli erilaisista työkaluista lähtien aina suuriin teollisuuden akkuihin. Käyttötarpeiden kasvu, kuten energiavarastot ja varsinkin sähköautojen yleistyminen ovat lisäämässä akkujen tarvetta lähitulevaisuudessa.

Li-ion-kennot ovat tuotannossa olevista akkuteknologioista paras vaihtoehto, eli täyttää akkuteknologialle annetut vaatimukset parhaiten. Koska litiumin korvaavien tekniikoiden kehitys on vasta alkutekijöissään, niin tarve Li-ion-akkutekniikkaan säilyy vielä pitkään ajankohtaisena.

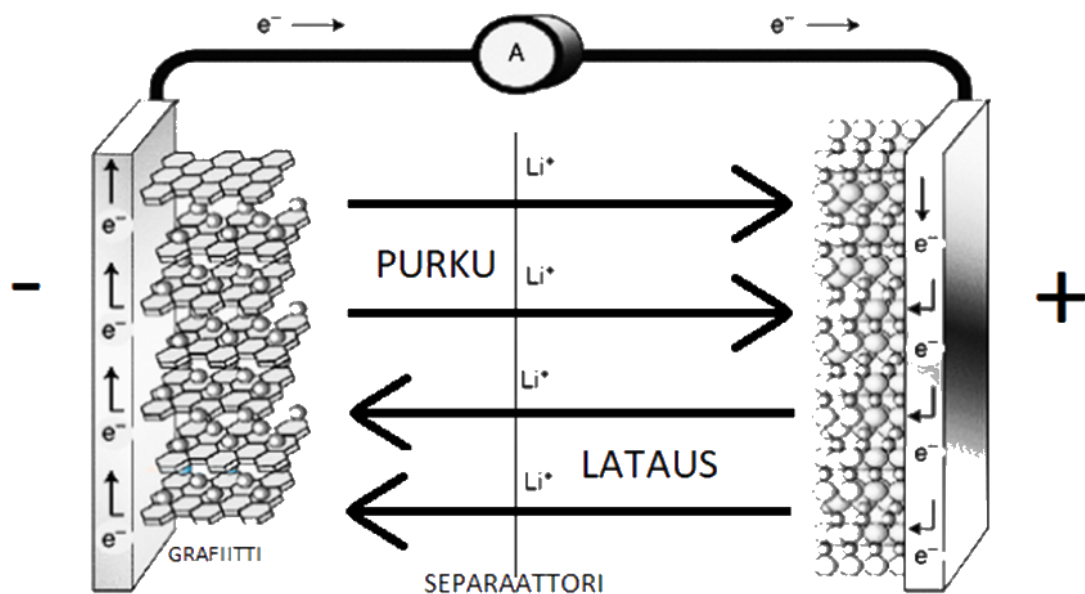
Tulevaisuudessa laitteiden koko ja tätä myötä myös akkujen koko ja tehon tarve tulee kasvamaan, tästä syystä Li-ion-akkujen kehittäminen ja parantaminen on erittäin ajankohtaista tänä päivänä. Kehittämisen pääalueet Li-ion-akuilla ovat kokoon nähden parannukset kapasiteettiin ja tehoon sekä lisäksi turvallisuuteen, lataus/purkunopeuteen, kapasiteettiin ja kestävyYTEEN halutaan parannusta [12].

2.2 Kennotyypit ja kemiat

Li-ion-kenno koostuu elektrolyytistä, negatiivisesta anodista, positiivisesta katodista ja separaattorista, joka estää anodin ja katodin kosketuksen. Elektrolyytti on aine, jonka avulla litiumionit siirtyvät. Kuvassa 2.1 on kuvattu kennon rakennetta ja toimintaa.

Litiumkennoja on käytössä useita erilaisia, jotka sisältävät erilaisia kemiallisista koostumuksia. Kennot on nimetty kennossa katodina, anodina ja elektrolyytinä käytettyjen metallioksidien mukaan [13]:

- LFP: Litium, rauta ja fosfaatti
- LCO: Litium ja kobolttioksidi
- LMO: Litium ja mangaanioksidi
- NMC: Litium, nikkeli, mangaani- ja kobolttioksidi
- LTO: Litium ja titanaattioksidi
- NCA: Litium, nikkeli, koboltti- ja alumiinioksidi



Kuva 2.1 Litiumkennon periaatekuva [14].

Tähän työhön valittiin kolme erilaista kemiaa, valittujen kennojen kemiat ovat litium-mangaanioksidi (LMO), litium-rautafosfaatti (LFP) ja litiumtitanaattioksidi (LTO).

Litium-mangaanioksidi LMO

LMO-kenno koostuu LiMn_2O_4 -katodista ja grafiittipohjaisesta anodista. LMO-kennot ovat olleet kaupallisessa käytössä vuodesta 1996. Ominaisuuksiltaan LMO-kennot ovat turvallisia ja antavat hyvää tehoa. [15]

Pääasiallisena käyttökohteena LMO-kennoja käytetään mm. työkaluissa, lääketieteen laitteissa sekä sähköisessä voimansiirrossa (autot ym.)

Litium-rautafosfaatti LFP

LFP-kenno koostuu LiFePO_4 -katodista ja grafiittipohjaisesta -anodista. LFP-kennot ovat olleet kaupallisessa käytössä vuodesta 1996. Ominaisuuksiltaan LFP-kennot ovat suhteellisen turvallisia, hyviä lämmönkestossa ja pitkäikäisiä käytössä. [15]

Pääasiallisena käyttökohteena LFP-kennoja käytetään sellaisissa tuotteissa, joissa tarvitaan suurta virtaa ja kestoaa.

Litiumtitanaatti LTO

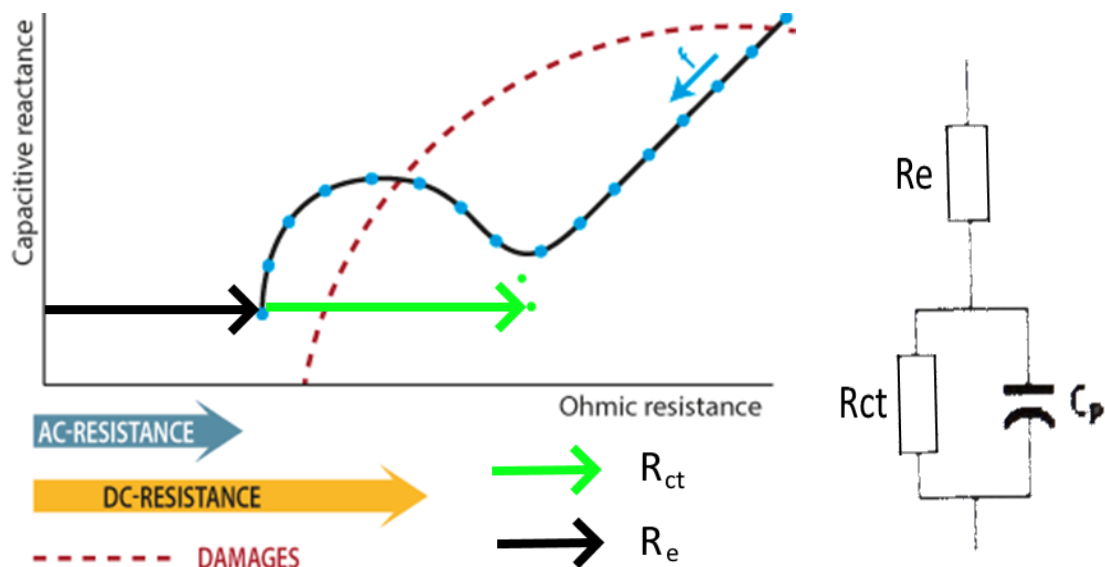
LTO-kenno koostuu LMO- tai NMC-katodista ja titanaatti ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)-anodista. LTO-kennot ovat olleet kaupallisessa käytössä vuodesta 2008. LTO-kennot ovat toistaiseksi turvallisimpia, suorituskykyisimpiä ja pitkäikäisimpiä tuotteita kaikista litiumioniakkutuotteista. [15]

Pääasiallisena käyttökohteena LTO-kennoja käytetään mm. UPS-laitteissa, sähköisessä voimansiirrossa ja aurinkovoimakäyttöisissä laitteissa.

2.3 Impedanssi

Kennon terveyttä eli kuntoa voidaan arvioida mittaamalla kennon sisäinen impedanssi [16]. Kuvassa 2.2 on impedanssikäyrän esimerkki kuvaaja ja siinä olevista tiedoista ovat tässä opinnäytetyössä mielenkiintoisia seuraavat asiat, R_e eli ohminen resistanssi ja R_{ct} eli varauksensiirtoresistanssi [3, s. 22]. ”Ohminen resistanssi kasvaa varastoitaessa korkeammissa lämpötiloissa” [6, s. 268]. Lisäksi tässä työssä seurattavia asioita olivat sääntö, kun ”kennon varaus on suuri, niin ohminen resistanssi on pieni” eli varauksen väheneminen kasvattaa resistanssia. Toisena sääntönä tarkkaillaan sitä, että lämpötilan nousun pitäisi pienentää resistanssia.

Kuvaaja, kuvassa 2.2, vastaa tyypillistä Li-ion-kennon Nyquist-kuvaajaa [17], kuvaajan arvot R_e :lle ja R_{ct} :lle saadaan Randlesin sijaiskytkennästä, joka nähdään oikeassa reu-nassa kuvassa 2.2. R_e :n arvo saadaan vaaka-akselilta (kuvassa 2.2 AC-resistance) ja R_{ct} on kuvassa olevan puoliympyrän matka arvioituna käyrän paluu 0-akselille, R_{ct} :n puoliympyrän huippukohtaa myös käytetään tässä työssä vertailuun.



Kuva 2.2: Kennon impedanssi ja Randlesin sijaiskytkentä [18]

3 MITTAUSTEN VALMISTELU

Testattavien kennojen kemiat olivat Litium-mangaanioksidi (LMO), Litium-rautafosfaatti (LFP) ja litiumtitanaattioksidi (LTO).

Mittaukseen otettiin mukaan viisi kennoa jokaisesta kolmesta kemiasta. Kennoja valittiin viisi, jotta voidaan poissulkea mahdolliset vialliset kennot. Mittauksissa oli siten mukana koko ajan yhteensä 15 kennoa. Mitattavat kennot rakenteeltaan sylinterin mallisia (kuva 3.1).

Mitattavat kennot:

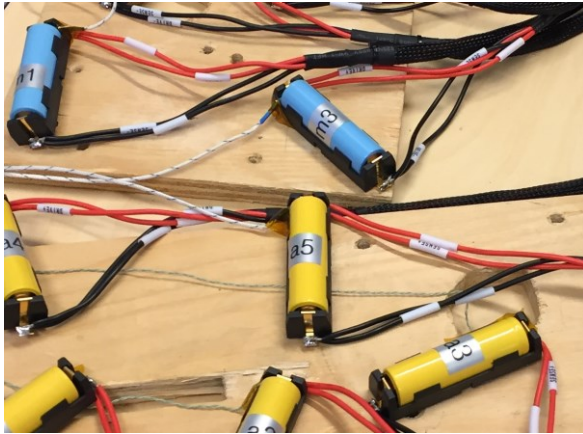
- LFP: GWL Power GB-LFP1865-11-100
- LTO: GWL Power LTO1865-13-5
- LMO: GWL Power GB1865-32MH-100



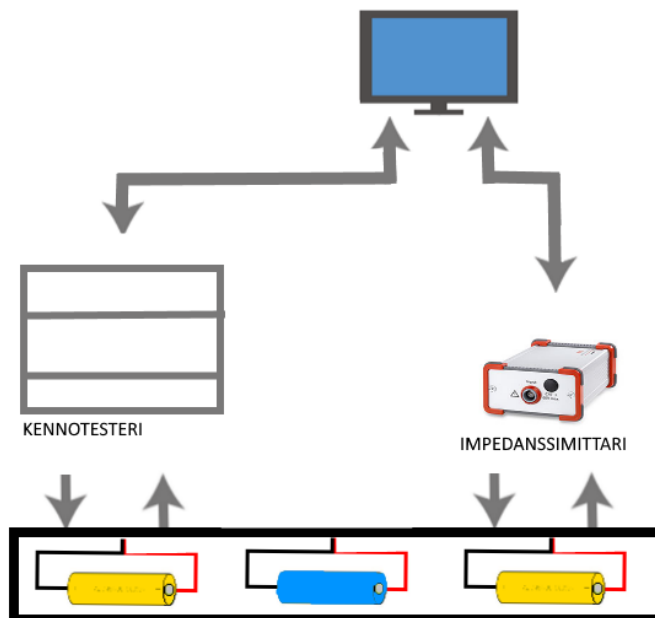
Kuva 3.1: Mitattavat kennot

3.1 Mittausjärjestelyt

Kennot kytkettiin kennotesteriin kaapelilla. Kaapeleihin juotettiin kennojen irrottamista ja uudelleen kytkemistä helpottavat adapterit (kuva 3.2). Lisäksi adaptoreita käytettäessä varmistettiin, että kontakti kennon ja kennotesterin välillä säilyy varmasti. Kuvassa 3.3 mittauksen kytkennät.



Kuva 3.2 Kennot kytkettynä adaptereihin



Kuva 3.3 Mittauskytkennät

3.2 Kennotesteri

Kennotesterinä käytettiin laitetta nimeltä Croma 17011 Battery Cell Tester. Kennotesterialla voidaan ladata ja purkaa kennoja. Lisäksi laitteesta saadaan mittaustuloksia, kuten jännite, virta, ladattu/purettu kapasiteetti ja kennon lämpötila, kuvassa 3.3 kytkennät.

Kennotesterin ohjelmointi tapahtui tietokoneella Chroma Battery Pro -ohjelmistolla (kuva 3.4) ja samalla ohjelmistolla, raportointi työkalulla, saatiin myös mittaustulokset Excel-tiedostoina.

Kennotesteriin ohjelmoitiin lataus- ja purkuprofiilit. Li-ion-kennolle on tärkeää välttää yli- ja alijännitteitä, joten profiileihin asetettiin raja-arvot siten että pysyttiin valmistajan antamien spesifikaatioiden sisällä. Lisäksi varoitoimenpiteenä käytettiin ohjelman katkaisua, mikäli lämpötila nousee yli 70 °C:n.



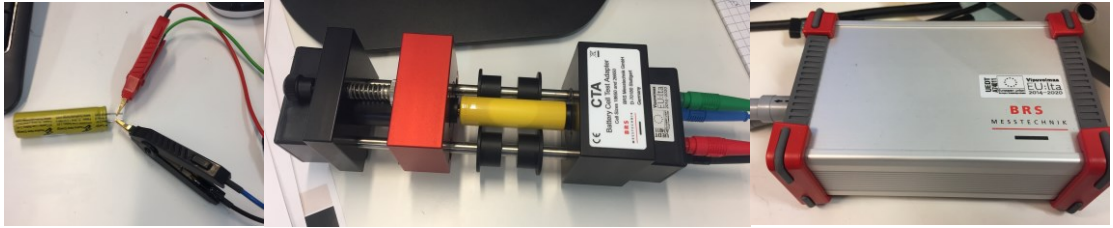
Kuva 3.4: Chroma 17011 käyttöliittymänä Chroma Battery Pro -ohjelma

3.3 Impedanssimittari

Impedanssimittarilla mitattiin kennon sisäinen impedanssi. Mittauksissa käytettiin lähinnä BRS Messtechnikin impedanssimittaria BIM2 (kuva 3.5) mutta HIOKI IM3590 -mittarilla mitattiin vertailun vuoksi muutamia kennoja mittausten väleissä.

Impedanssimittarilla mitataan taajuusalueella 0,1 Hz – 1 kHz kennon impedanssi. Taajuusalue on jaettu 24 eri taajuuteen, joista jokaisessa pisteessä mittari antaa kennolle impedanssin arvon eli reaaliosan $Re(Z)$ (ohminen resistanssi) ja imaginääriosan $Im(Z)$ (kapasitiivinen resistanssi).

BIM2 kytkettiin USB-johdolla tietokoneeseen, ja mittari antoi mittaustulokset suoraan tietokoneelle CSV-tiedostoina (kuva 3.3).



Kuva 3.5: Impedanssimittari

Sääkaappi

Mitattavat kennot sijoitettiin sääkaappiin, sääkaappi oli Espec:in valmistama PL-2KP. Kaappia käytettiin kennojen lämmittämiseen 60 °C asteeseen ja viilentämiseen -20 °C asteeseen. Kuvassa 3.6 kennot sääkaapissa siten, että ylähyllyllä LFP- ja LMO-kennot ja alahyllyllä LTO-kennot.



Kuva 3.6: Sääkaappi ja kennot

4 MITTAUKSET

Mittaukset aloitettiin sisään ajamalla uudet kennot esitestiohjelmalla, siten että kennot ladattiin täyteen ja purettiin. Tämä toistettiin vielä kahteen kertaan, jotta varmistettiin, että kennoissa ei ole vikaa ja kennojen varausaste toisiinsa verrattuna on samanlainen. Sisäänajossa huomattiin yhden kennon purkavan liian nopeasti, joten kenno vaihdettiin varsinaisen mittauksen alkaessa. Mittaukset suoritettiin Turun ammattikorkeakoulun akkulaboratoriossa.

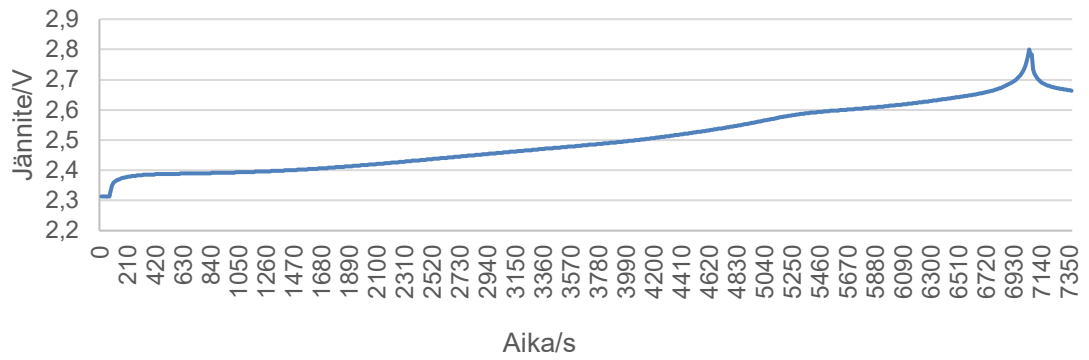
4.1 Lataus huoneenlämmössä

Akut ladattiin 0,5 C:n virralla, joka on LMO-kennon valmistaja ilmoittanut normaaliksi latausvirraksi, muilla kennoilla optimi latausvirta oli merkitty korkeammaksi, mutta testaus-ten yhtenäisyyden vuoksi ladattiin kaikki samalla virralla.

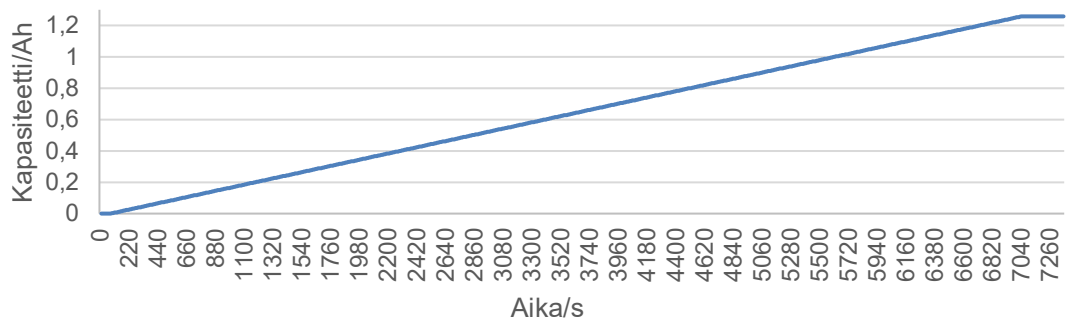
Mittauksissa käytetyt latausvirrat olivat seuraavat:

Kenno	0,5 C
LTO	0,65 A
LFP	0,55 A
LMO	1,55 A

Kennot ladataan ensin täyteen. LTO-kennot ladataan 0,65 A:n tasavirralla. Kennoa ladataan, kunnes kennon jännite on valmistajan ilmoittaman maksimijännitteen tasolla eli 2,8 V, kuvasta 4.1 nähdään, että lähestyttäessä maksimijännitettä, jännitteen nousu kiihtyy. Latauksen jälkeen kennon jännite tasaantuu ja laskee hieman alaspäin ja jää 2,8 V tasolle. Kuvassa 4.2 nähdään kennon varaaman kapasiteetin kasvu latauksen aikana, kennon varaus lisääntyy tasaisesti, eikä jännitteen kiihtyvä nousu näy, eli toimii kuten pitääkin.

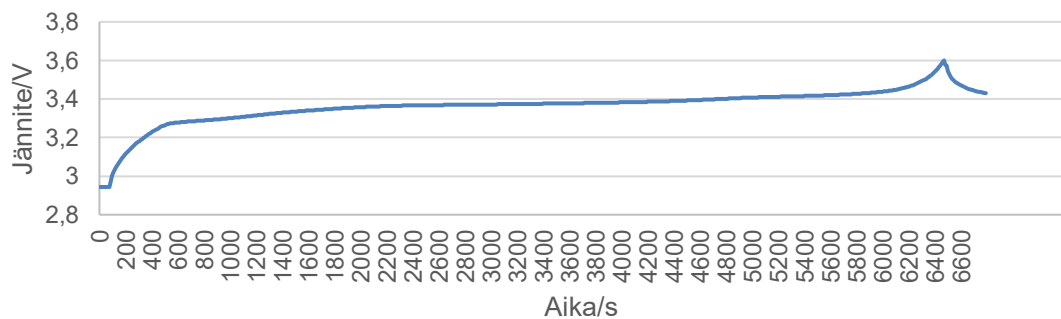


Kuva 4.1: LTO-kennon kokonaisjännite latauksen aikana

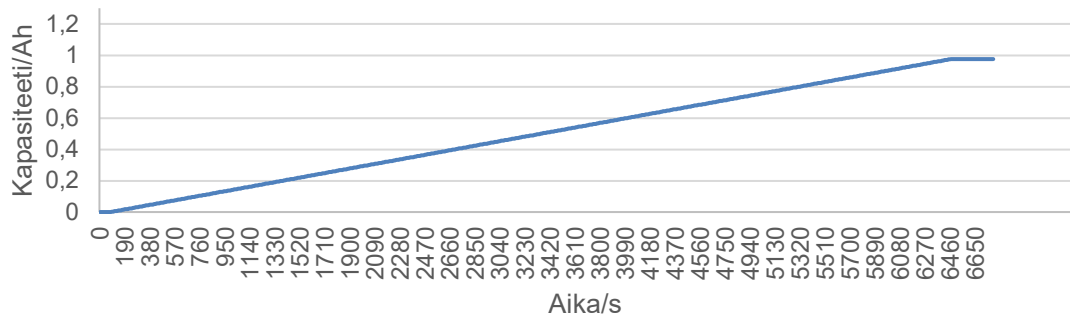


Kuva 4.2: LTO-kennon kapasiteetti latauksen aikana

Kuvassa 4.3 LFP-kennoa ladataan 0,55 A:n tasavirralla. Kennoa ladataan, kunnes kennon jännite on valmistajan ilmoittaman maksimijännitteen tasolla eli 3,6 V. Latauksen jälkeen kennon jännite tasaantuu ja laskee hieman alaspäin ja jää 3,3 V tasolle. Kuvassa 4.4 nähdään kennon varaaman kapasiteetin kasvu latauksen aikana

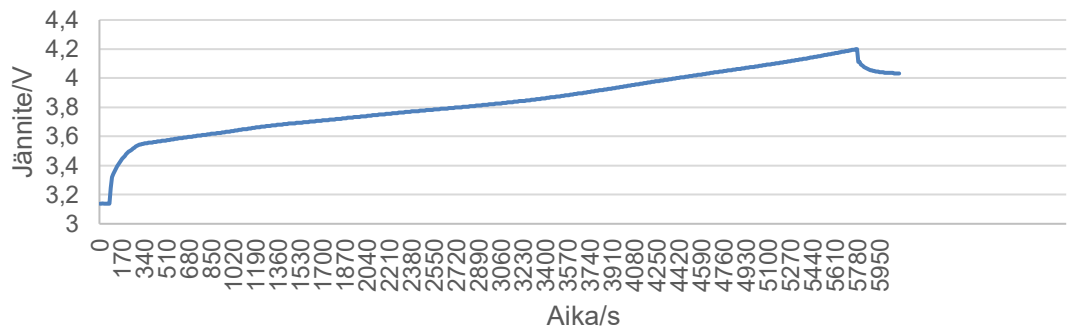


Kuva 4.3: LFP-kennon jännite latauksen aikana

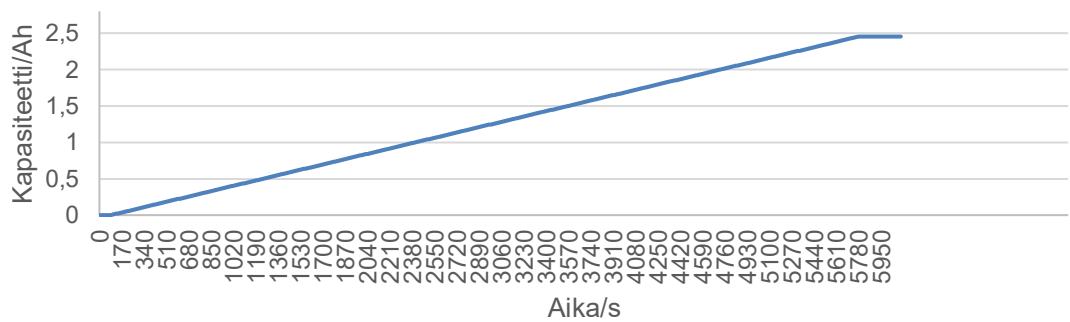


Kuva 4.4: LFP-kennon kapasiteetti latauksen aikana

Kuvassa 4.5 LMO-kennoa ladataan 1,55 A:n tasavirralla. Kennoa ladataan, kunnes kennon jännite on valmistajan ilmoittaman maksimijännitteen tasolla eli 4,2 V. Latauksen jälkeen kennon jännite tasaantuu ja laskee hieman alaspäin ja jää 4,0 V tasolle. Kuvassa 4.6 nähdään kennon varaaman kapasiteetin kasvu latauksen aikana



Kuva 4.5: LMO-kennon jännite latauksen aikana



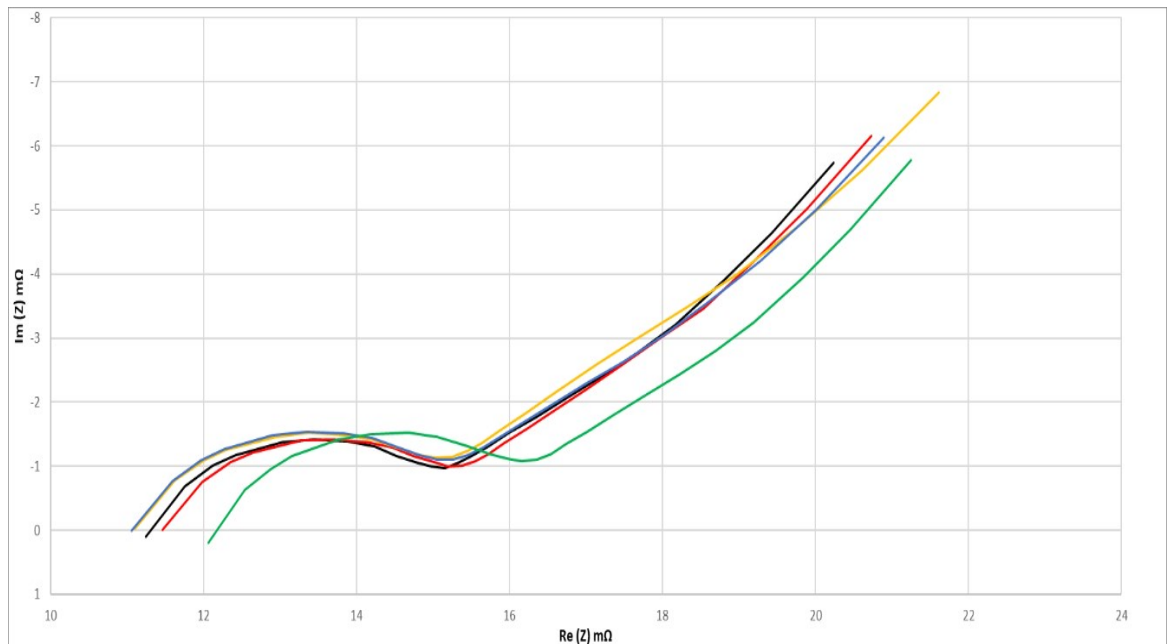
Kuva 4.6: LMO-kennon kapasiteetti latauksen aikana

4.2 Impedanssimittaukset

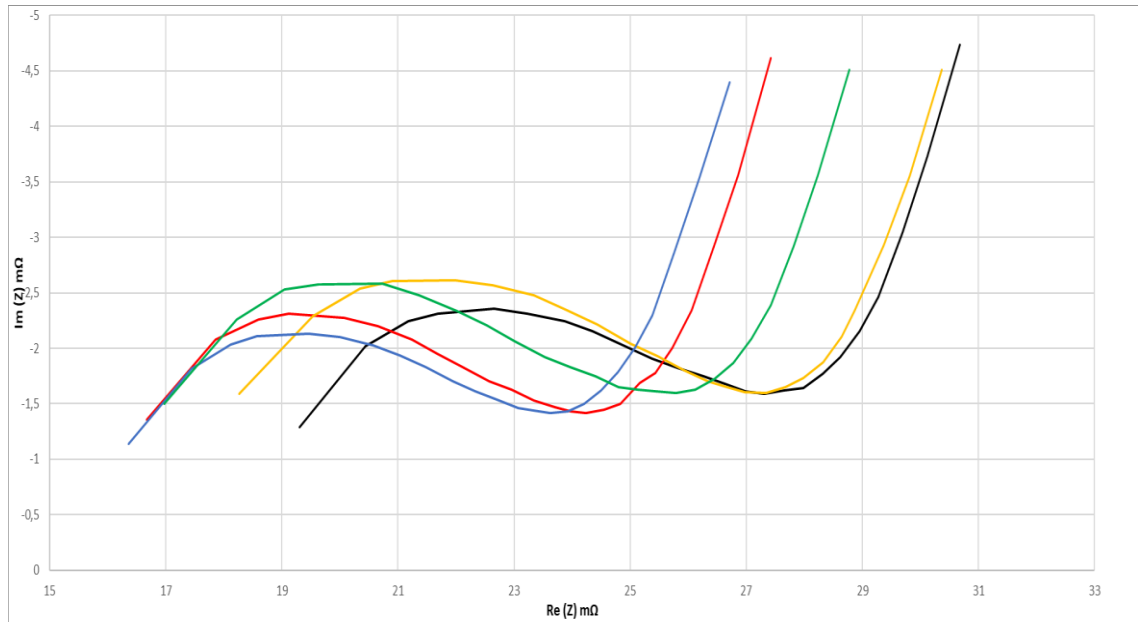
Kuvassa 4.7 on kaikkien testissä olleiden LTO-kennojen impedanssit. Kuvaajissa on hyvin pientä eroa, joten voidaan olettaa laadun olevan tasaista.

LFP-kennojen impedanssit erosivat toisistaan hieman enemmän kuin muilla kennoilla (kuva 4.8), näistä käyristä voimme olettaa, että laatu ei ole tasainen LFP-kennoilla. LFP-kennoilla huomattiinkin mittauksissa suuria eroja eri kennojen välillä.

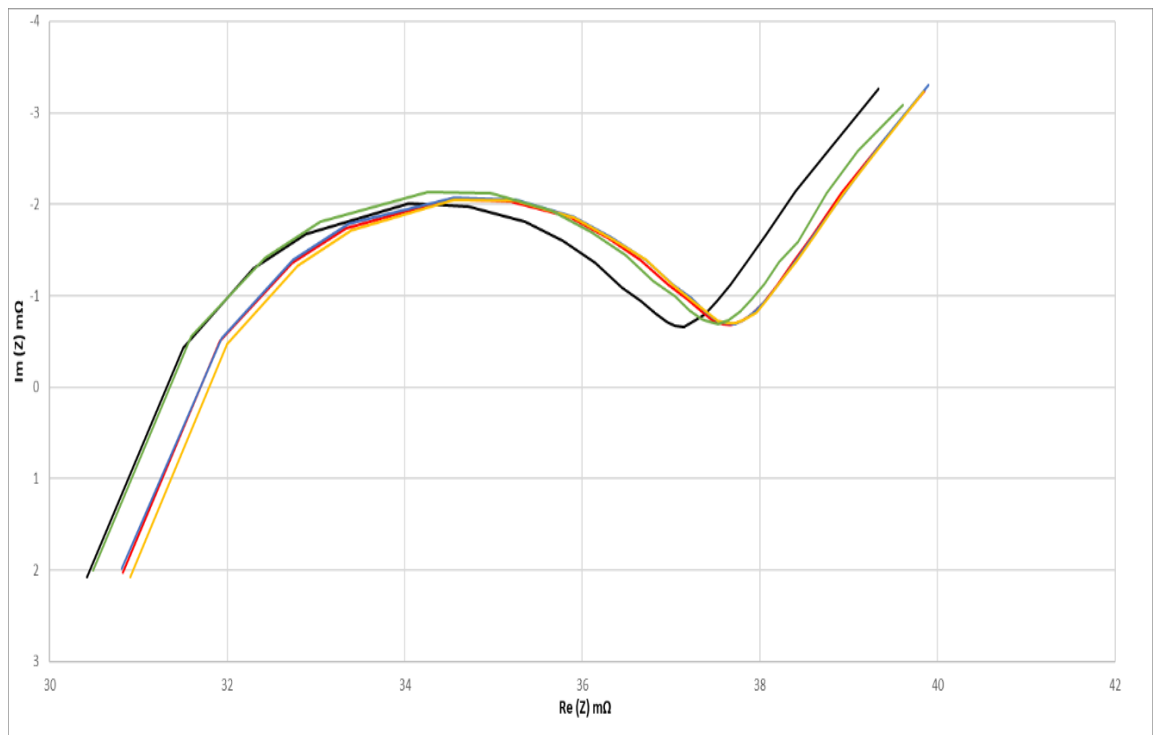
LMO-kennoilla kuvaajat (kuva 4.9) ovat myös keskenään erittäin tasaiset. Kuvaajat myös vastaavat tyypillistä Li-ion-kennon Nyquist-kuvaajaa.



Kuva 4.7: LTO-kennojen impedanssi täyteen ladattuna



Kuva 4.8: LFP-kennojen impedanssi täyteen ladattuna



Kuva 4.9: LMO-kennojen impedanssi täyteen ladattuna

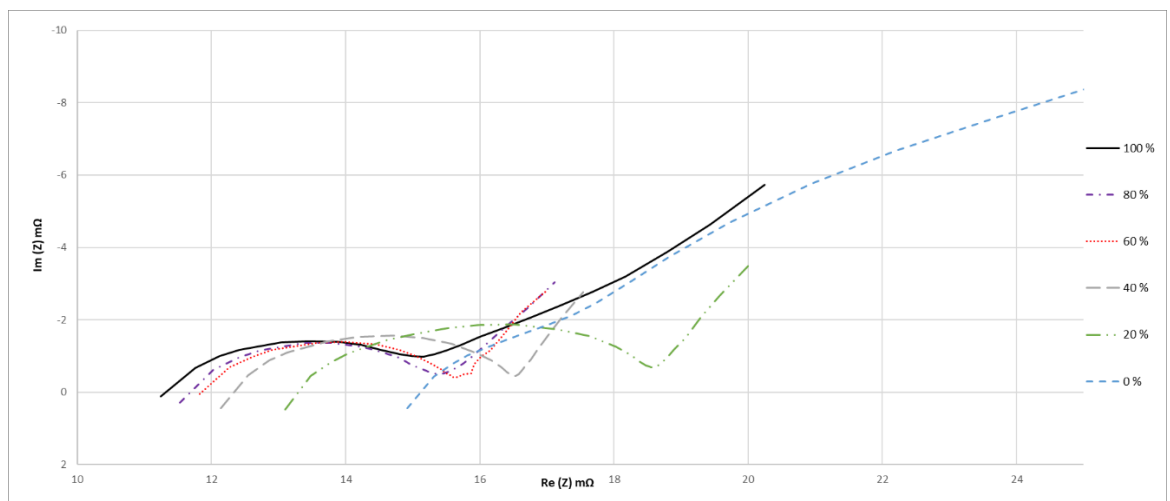
4.3 Purku huoneenlämmössä

Testaaminen aloitettiin kennojen purulla, täyteen ladattuja kennoja purettiin ensin 20 %. Purku suoritettiin purkamalla 0,5 C -virralla kennoja 24 min:n ajan, jolloin kennosta purkautuu 20 % alkuperäisestä kapasiteetista. Kun purkaminen oli suoritettu, mitattiin kennon impedanssi jälleen impedanssimittarilla.

Kennot kytkettiin takaisin kennotesteriin ja purettiin kennoa 20 % lisää. Kennoja purettiin aina 20 % välein, kunnes kenno on tyhjä ja jokaisen purun jälkeen mitattiin impedanssi.

LTO-kennojen osalta mittaustuloksina saatiin kuvassa 4.10 olevat ajalta impedanssikäyrät, samat impedanssikäyrät löytyvät erillisinä kuvina liitteestä 1, josta saa tarvittaessa tarkemman kuvan yksittäisestä käyrästä.

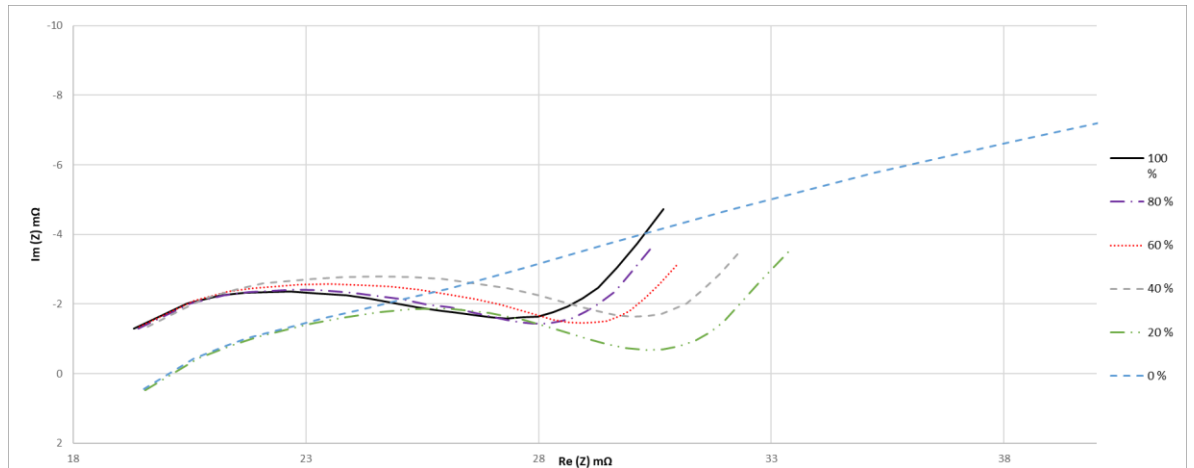
Kuvasta selviää, että kun varaustaso (SOC) laskee R_e kasvaa. Puoliympyrän muoto kasvaa eli R_{ct} suuruus kasvaa ja puoliympyrän alueella matalimman $\text{Im}(Z)$ arvon antama taajuus pienenee [17].



Kuva 4.10: LTO-kennon impedanssikäyrät purkamisen aikana, samaan kuvaajaan liitettynä

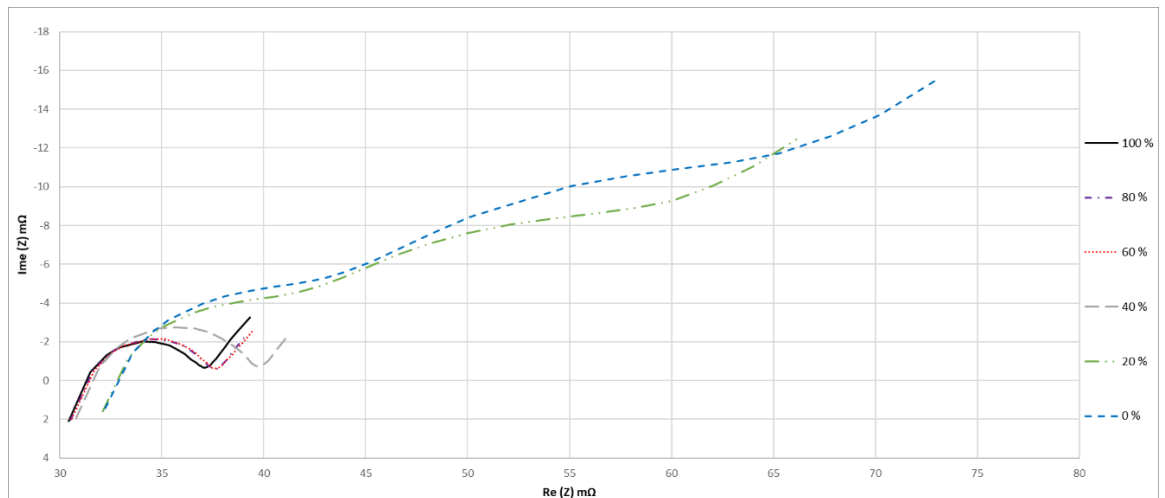
LFP-kennojen mittaustuloksista (kuva 4.11) nähdään, että varaustason laskiessa R_e ei aluksi muutu juurikaan ja vasta varaustasolla 20 % R_e putoaa ja jää samaan myös tyhjänä. R_{ct} nousee vain hieman kennon tyhjentymässä ja huippukohdan taajuus pienenee.

LFP-kennoista löytyvät samat impedanssikäyrät erillisinä kuvina liitteestä 2, josta saa tarvittaessa tarkemman kuvan yksittäisestä käyrästä.



Kuva 4.11: LFP-kennon impedanssikäyrät samaan kuvaajaan liitettynä varaustasot 100 %-0 %

LMO-kennojen mittaustulokset ovat kuvassa 4.12, kennon osalta samat impedanssikäyrät löytyvät erillisinä kuvina liitteestä 3, josta saa tarvittaessa tarkemman kuvan yksittäisestä käyrästä. LMO-kennojen käyttäytyminen purun aikana täysin vastaava kuin LFP-kennoilla.



Kuva 4.12: LMO-kennon impedanssikäyrät samaan kuvaajaan liitettynä varaustasot 100 %-0 %

4.4 Purku lämpimässä tilassa

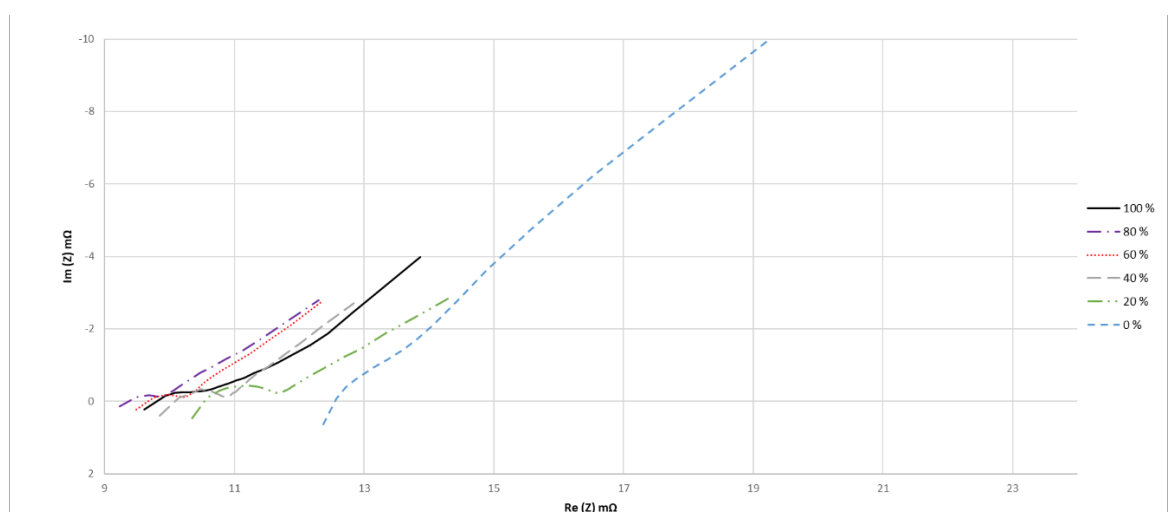
Huoneenlämmössä ladatut kennot lämmitetään sääkaapissa 60 °C:n. Kennojen annetaan olla kaapissa kaksi tuntia, jotta kennot olisivat mahdollisimman hyvin lämmentyneet myös sisältä. Lämmitysaika ennen purkua valittiin sellaiseksi, että kennot lämpiävät mahdollisimman kauan, kuitenkin siten, että mittaukset ehdittiin tekemään vielä saman päivän aikana, koska turvallisuuden ym. olosuhteiden vuoksi sääkaappia ei voinut jättää yöksi päälle.

Mittaukset, jotka tehtiin huoneenlämmössä, toistetaan täysin vastaavanlaisesti lämmitetyille kennoille. 60-celsiusasteiset kennot otettiin yksitellen pois sääkaapista impedanssimittauksen ajaksi, joka kesti n. 3 minuuttia kennoa kohti.

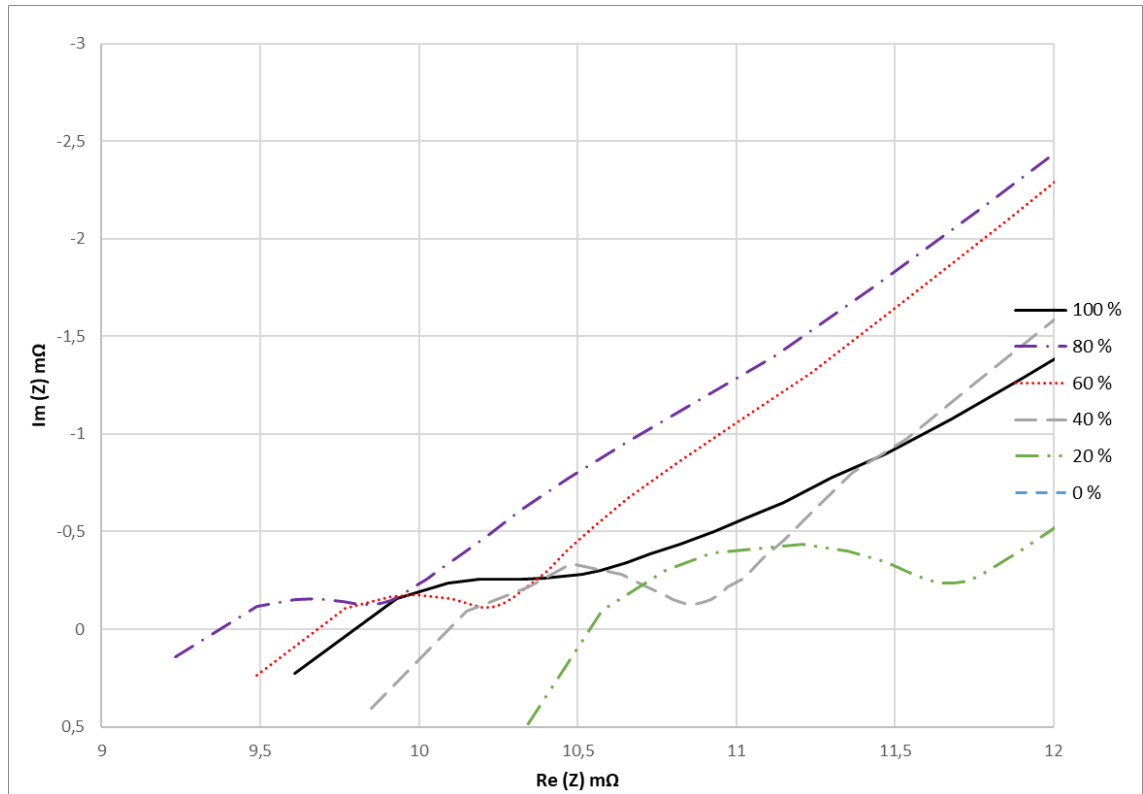
Mittauksena saatiin impedanssikäyrät eri kennoille. LTO-kennon osalta käyrien muutokset täydestä tyhjään vasemmalta oikealle kuvassa 4.13 ja kuvassa 4.14 sama kuva, mutta käyrän alkupää suurennettuna.

Kuvaajista nähdään, että lämpötilan nousu vaikuttaa selkeästi kemialliseen rakenteeseen ja muutokset ovat ennalta arvaamattomia. Käyrät eivät noudata täysin huoneenlämmössä mitattua käyrää vaan R_e arvot pienenevät alkuun tyhjentäessä ja vasta SOC 40% kohdalla R_e ja R_{ct} arvot ovat suuremmat kuin täyden kennon kohdalla.

Samat impedanssikäyrät löytyvät erillisissä kuvissa liitteestä 4, josta saa tarvittaessa tarkemman kuvan yksittäisestä käyrästä.



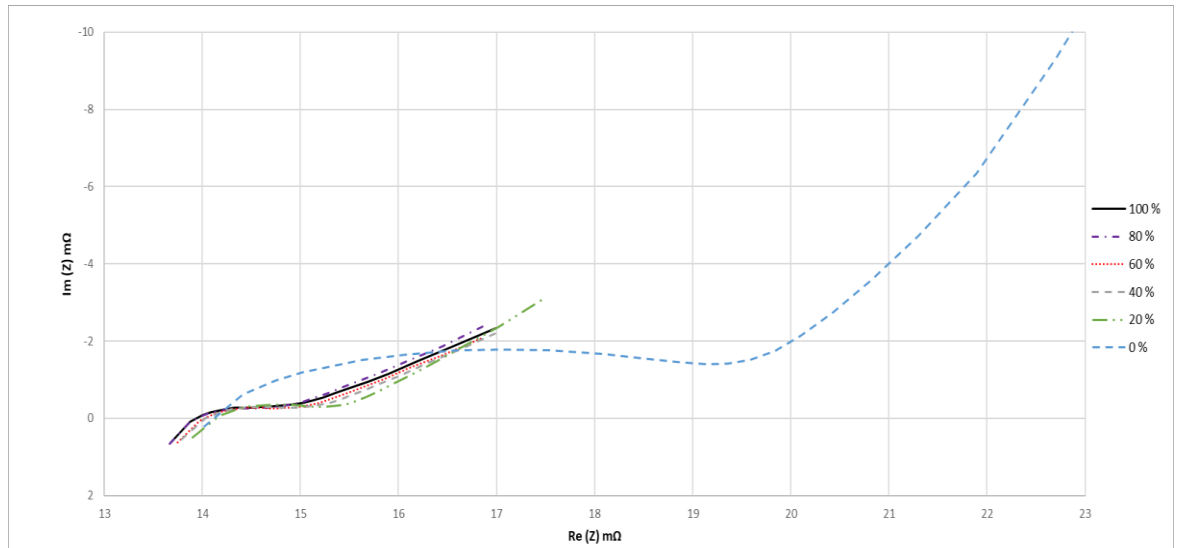
Kuva 4.13: LTO-kennojen impedanssit varaustasot 100–0 %



Kuva 4.14: LTO-kennojen impedanssit suurennettuna kuvasta 4.13

LFP-kennon osalta käyrien muutokset täydestä tyhjään vasemmalta oikealle kuvassa 4.15. Kuvaajasta nähdään, että lämpötilan nousu vaikuttaa kennon kemialliseen rakenteeseen, verrattuna huoneenlämmössä otettuun kuvaajaan (kuva 4.10). R_e ja R_{ct} arvot eri SOC vaiheissa ovat selkeästi pienempiä kuin huoneen lämmössä. LFP-kennot kuitenkin toimivat ennustettavammin kuin LTO-kennot, eli tyhjentymässään R_e ja R_{ct} arvot ovat suurenevat.

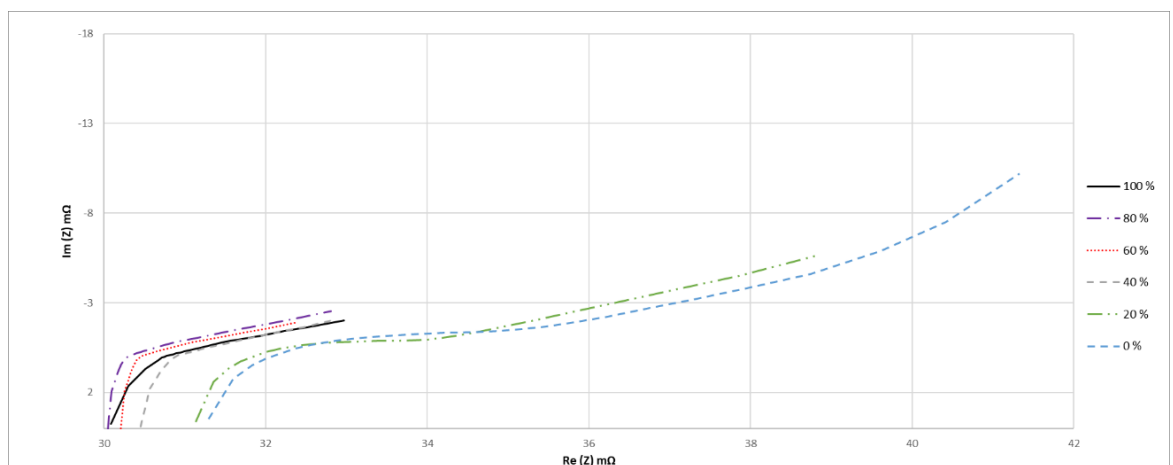
Samat impedanssikäyrät löytyvät erillisissä kuvissa liitteestä 5, josta saa tarvittaessa tarkemman kuvan yksittäisestä käyrästä.



Kuva 4.15: LFP-kennojen impedanssit

LMO-kennon osalta käyrien muutokset täydestä tyhjään vasemmalta oikealle, kuvassa 4.16). Samat impedanssikäyrät LMO-kennoista löytyvät erillisissä kuvissa liitteestä 6. Kuvaajasta nähdään, että lämpötilan nousu vaikuttaa kennon kemialliseen rakenteeseen selkeästi, verrattuna huoneenlämmössä otettuun kuvaajaan (kuva 4.11). R_e arvot eivät ole muuttuneet juurikaan verrattuna huoneenlämmössä mitattuihin kennoihin.

Kuvaajat SOC 100% - 40% eivät seuraa Nyquistin-kuvaajaa, eikä tällä mitatulla tarkkuudella pysty R_{ct} arvoa edes arvioimaan. Vasta tyhjänä ja varaustasolla 20% kohdalla pystytään R_{ct} arvo suunnilleen arvioimaan.



Kuva 4.16: LMO-kennojen impedanssit

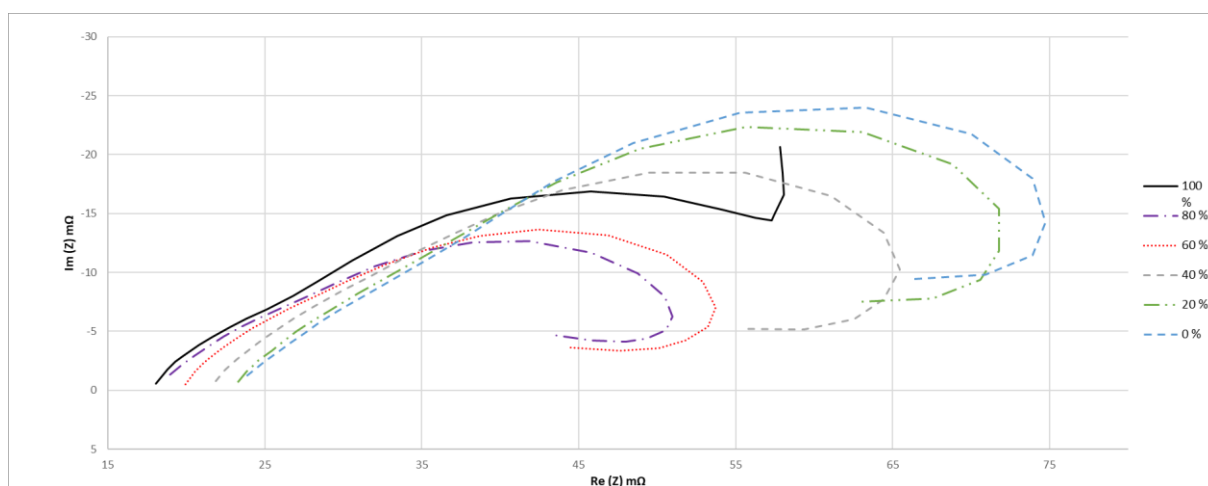
4.5 Purku kylmässä tilassa

Huoneenlämmössä ladatut kennot viilennetään sääkaapissa -20 °C :n. Kennojen annetaan olla kaapissa ensin kaksi tuntia ennen ensimmäisiä mittauksia, jotta kennot olisivat mahdollisimman viileät myös sisältä. Viilennysaika ennen purkua valittiin sellaiseksi, että kennot viilenevät mahdollisimman kauan, kuitenkin siten, että mittaukset ehdittiin tehdä vielä saman päivän aikana, koska turvallisuuden ym. olosuhteiden vuoksi sääkaappia ei voinut jättää yöksi päälle.

Aiemmin huoneenlämmössä ja 60 °C tehdyt mittaukset toistetaan täysin vastaavanlaisesti. Kennot, jotka ovat -20 °C otettiin yksitellen pois sääkaapista impedanssimittauksen ajaksi, joka kesti n. 3 minuuttia kennoa kohti.

Mittaustuloksena saatiin impedanssikäyrät eri kennoille. LTO-kennon osalta käyrien muutokset täydestä tyhjään nähdään kuvassa 4.17, vasemmalta oikealle. Täytenä kennon impedanssi käyrä on muistuttaa vielä alkuperäistä käyrää ja purettaessa R_e kasvaa. Matalilla taajuuksilla impedanssin reaaliosa alkaa jälleen kasvaa.

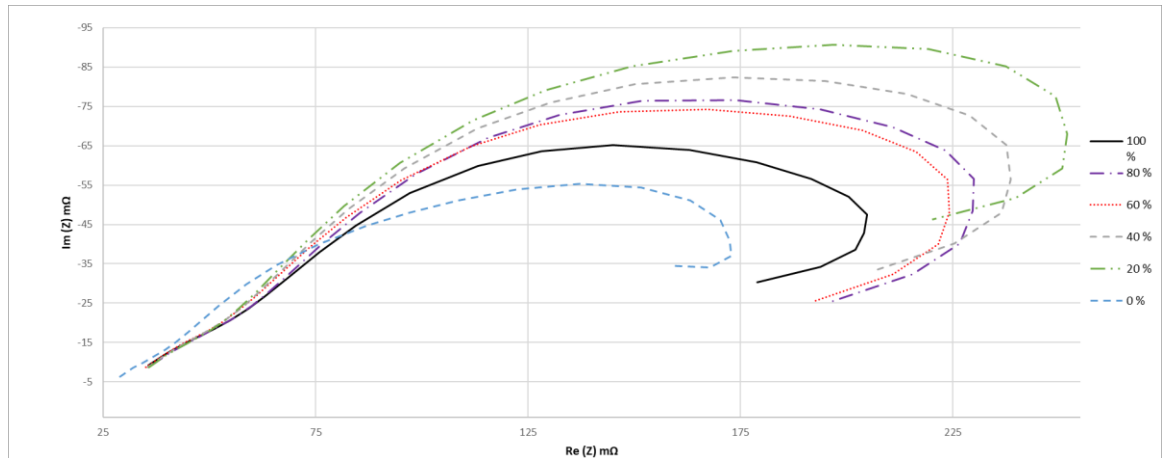
Samat impedanssikäyrät löytyvät erillisissä kuvissa liitteestä 7, josta saa tarvittaessa tarkemman kuvan yksittäisestä käyrästä.



Kuva 4.17: LTO-kennojen impedanssit

Kuvassa 4.18 impedanssikäyrät LFP-kennoilla, R_e arvo nousee verrattuna huoneen lämpöön. Purkamisen aikana R_e pysyy tasaisena ja R_{ct} kasvaa. Matalilla taajuuksilla impedanssin reaaliosa alkaa jälleen kasvaa.

Samat impedanssikäyrät löytyvät erillisissä kuvissa liitteestä 8, josta saa tarvittaessa tarkemman kuvan yksittäisestä käyrästä.

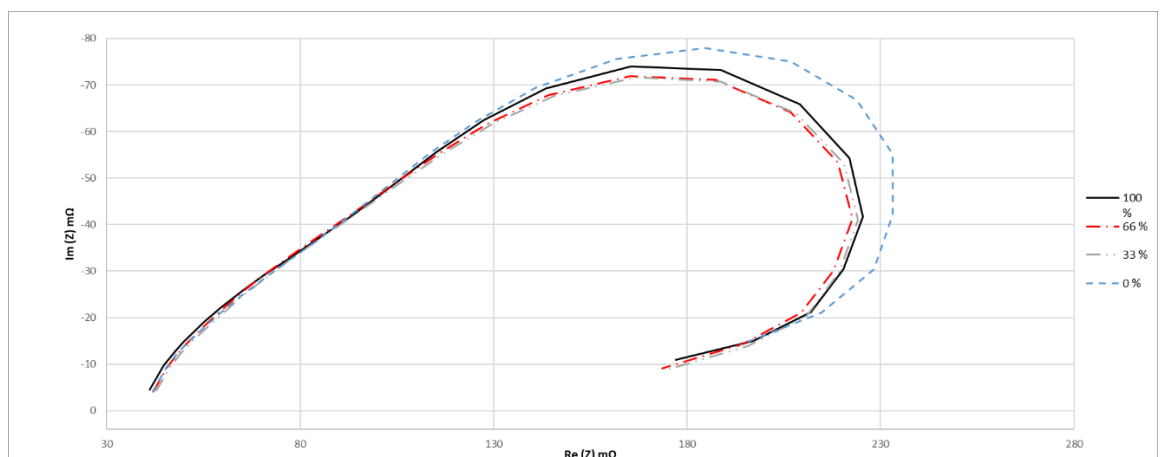


Kuva 4.18: LFP-kennojen impedanssit

Kuvassa 4.19 impedanssikäyrät LMO-kennoilla. R_e arvo nousee hieman verrattuna huoneen lämpöön. Purkamisen aikana R_e pysyy tasaisena eikä R_{ct} myöskään juuri muutu. Matalilla taajuuksilla impedanssin reaaliosa alkaa jälleen kasvaa.

LMO-kennoilla oli kylmässä huomattavissa selkeä heikentyminen ja tilanteessa, jossa oli SOC 50 % kennot olivat jo tyhjiä.

Samat impedanssikäyrät löytyvät erillisissä kuvissa liitteestä 9, josta saa tarvittaessa tarkemman kuvan yksittäisestä käyrästä.



Kuva 4.19: LMO-kennojen impedanssit

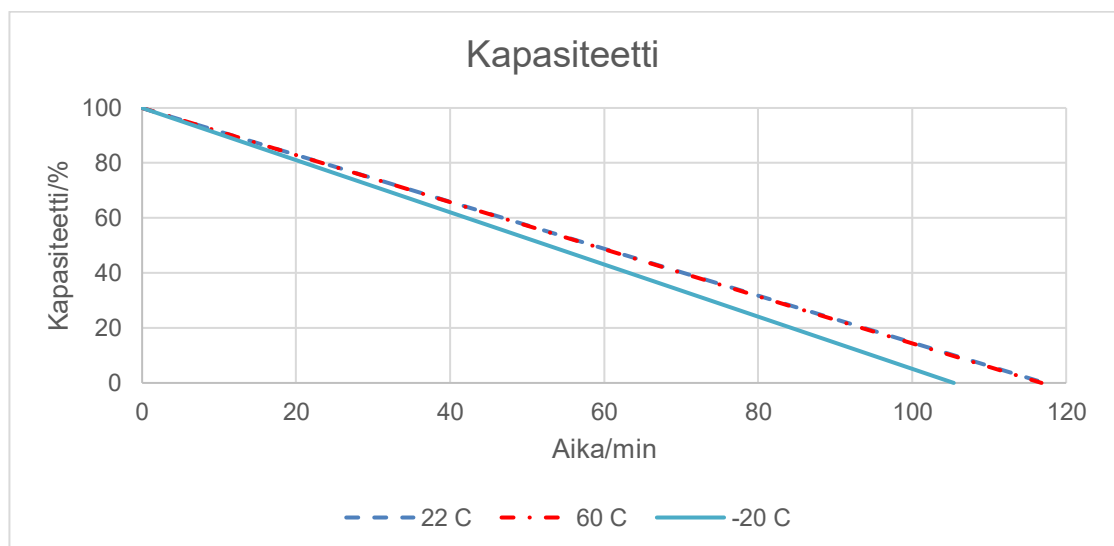
5 KENNOJEN VERTAILU ERI LÄMPÖTILOISSA

5.1 LTO-kennojen vertailu ja pohdinnat

Kapasiteetti

LTO-kennojen purkaminen eri lämpötiloissa vaikutus kenno kapasiteettiin kuvassa 5.1. 60°C:ssa purettu kenno piti kapasiteetin verrattuna huoneenlämmössä purettuna.

-20°C:ssa purettu kenno menetti n. 10 % kapasiteetistaan.



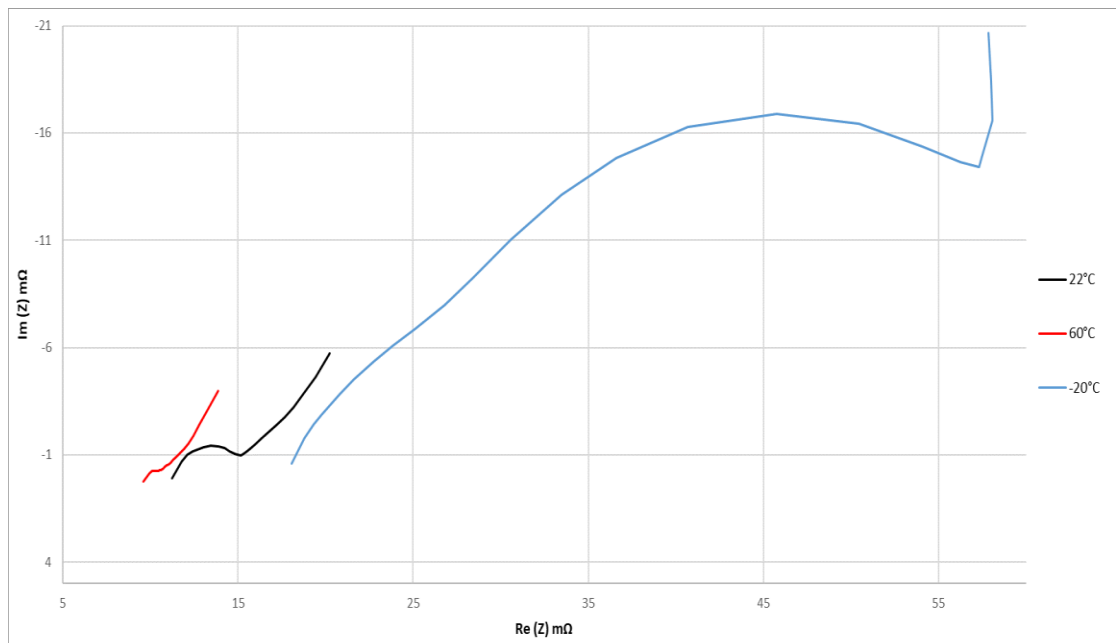
Kuva 5.1: Kennon kapasiteetti ajan purku ajan suhteen

Impedanssi

Vertaillaan LTO-kennoa täyteen ladattuna. Kuvassa 5.2 mustalla piirretty käyrä on kenno impedanssi huoneenlämmössä, punaisella piirretty on 60°C:ssa ja sininen -20°C:ssa. Taulukossa 5.1 impedanssin arvoja, taajuuden suhteen, näistä arvoista muodostuu kuvassa 5.2 näkyvät kuvaajat.

Kuvaajasta nähdään, että lämpötilan kasvaessa ohminen resistanssi R_e ja varauksen-siirtoresistanssi pienenevät.

”Kuvaajan arvojen pitäisi olla induktiivista korkeilla taajuuksilla ja kapasitiivista matalilla taajuuksilla. Impedanssin imaginääriosaa lasketaan kaavalla $\text{Im}(Z) = 1 / 2\pi fC(f)$, jossa f on taajuus, C on kapasitanssi” (15, sivu 268–269)



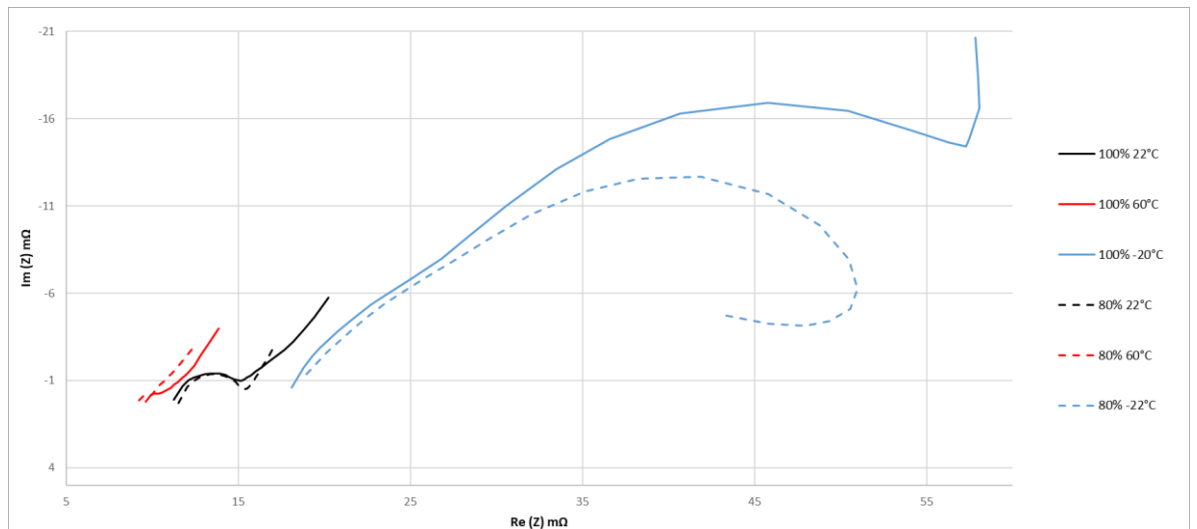
Kuva 5.2. LTO-kennon impedanssi varaustasolla 100 %

Taulukko 5.1: Impedanssin arvoja taajuuden mukaan

Hz	Re 22°C	Im	Re 60°C	Im	Re -20°C	Im
1000	11,2438	0,1073	9,6087	0,2278	18,0792	-0,5807
100	13,442	-1,4151	10,3902	-0,2613	21,6237	-4,5065
10	15,1555	-0,9738	10,8221	-0,436	30,5761	-11,0305
1	16,7526	-2,0691	11,6774	-1,0769	54,091	-15,3515
0,1	20,2424	-5,7331	13,8654	-3,9823	57,8367	-20,6592

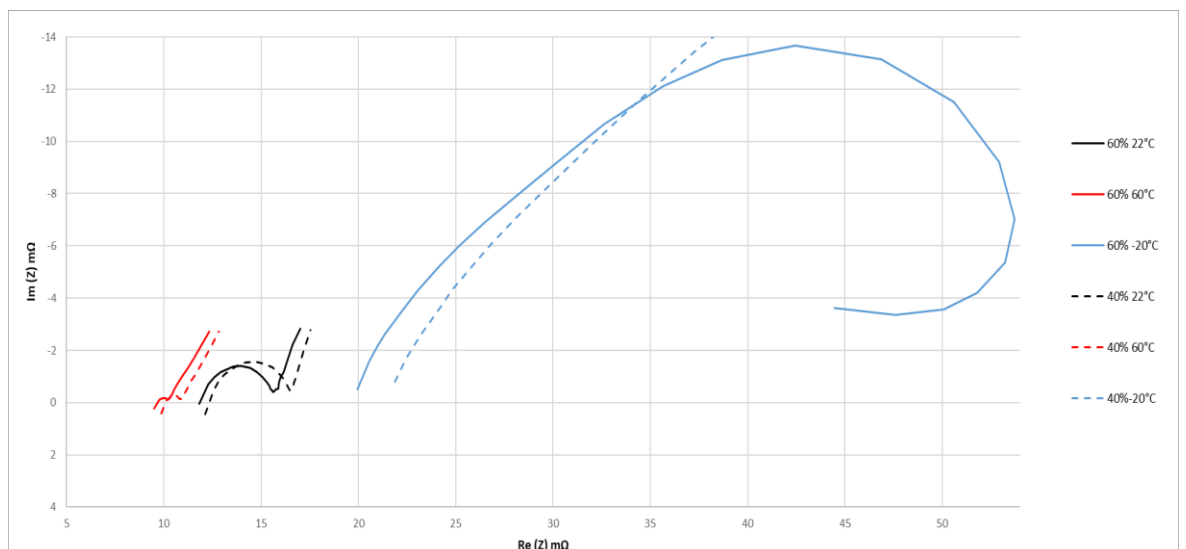
Kuvasta 5.3 nähdään, että lämpötilan kasvaessa ohminen resistanssi R_e ja varauksen-siirtoresistanssi pienenevät. Kuvassa olevien täyden kennon ja 20 % puretun kennon

impedanssikäyrien eroja vertailtaessa nähdään lisäksi, että varauksen pienentyessä sekä R_e että R_{ct} pienenevät.

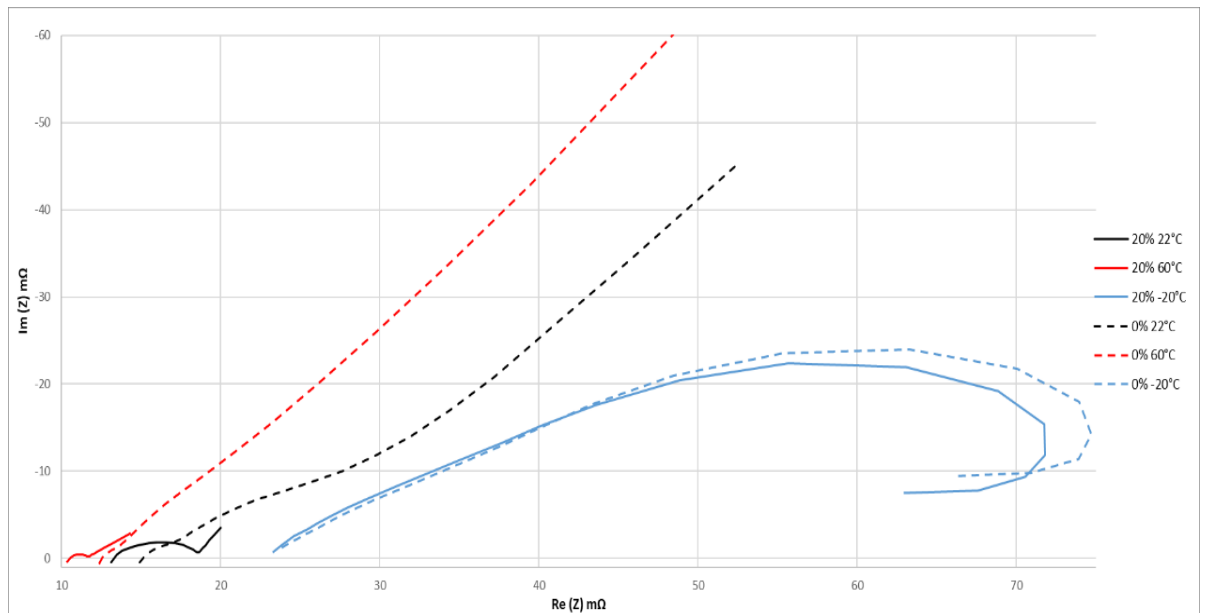


Kuva 5.3: LTO-kennot varaustasoilla 80 % ja 100 %

Kuvista 5.4 ja 5.5 nähdään, että aiemmassa kuvassa olleet muutokset jatkavat saman suuntaisina eli lämpötilan kasvaessa R_e ja R_{ct} pienenevät ja varauksen pienentyessä sekä R_e että R_{ct} pienenevät.



Kuva 5.4 LTO-kennot varaustasoilla 40 % ja 60 %



Kuva 5.5 LTO-kennot varaustasoilla 0 % ja 20 %

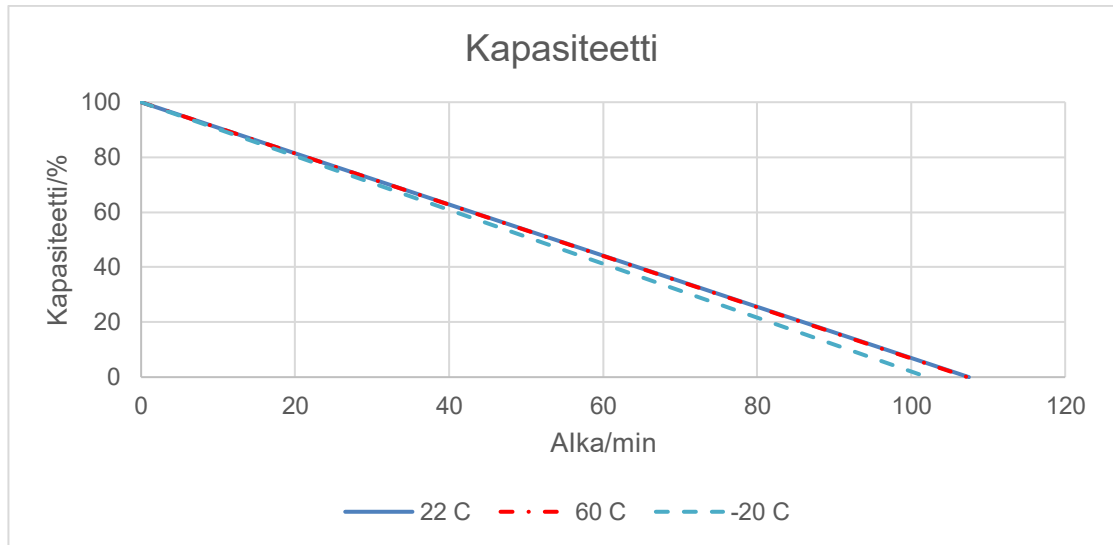
LTO-kennot säilyttivät parhaiten kemialliset ominaisuutensa, ohmisen resistanssin pienentyessä vain hieman ja varauksensiirtoresistanssin pienentyessä.

LTO-kennoissa oli testatuista kennoista selkeästi matalin sisäinen impedanssi, josta seuraa hyvä kyky luovuttaa ja vastaanottaa energiaa.

5.2 LFP-kennojen vertailu ja pohdinnat

Kapasiteetti

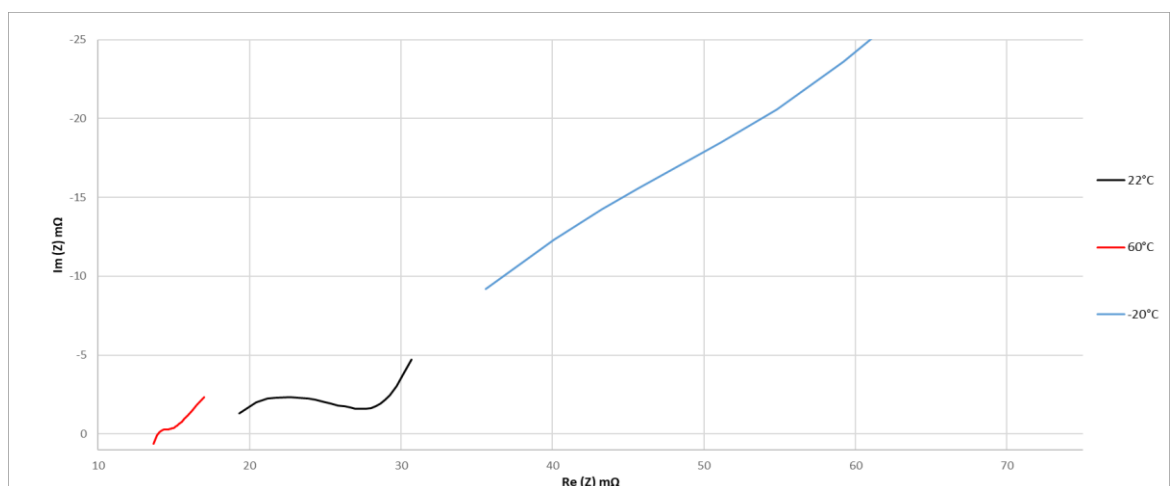
LFP-kennojen purkaminen eri lämpötiloissa vaikutus kennon kapasiteettiin on esitelty kuvassa 5.8. Eri lämpötiloissa puretut kennot pitivät kapasiteettinsa hyvin.



Kuva 5.6: Kennon kapasiteetti purku ajan suhteen

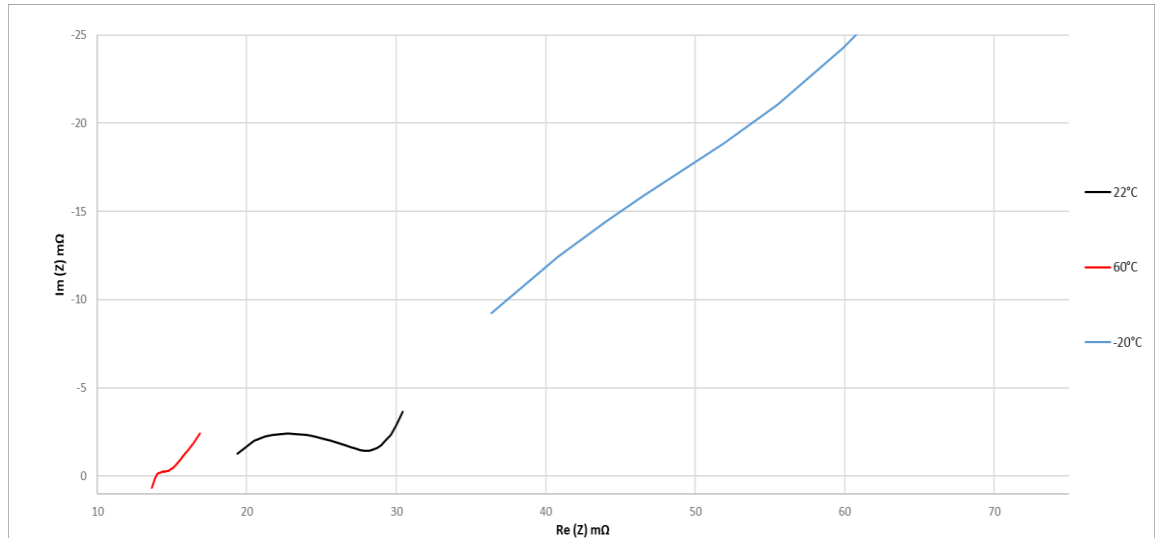
Impedanssi

Vertaillaan LFP-kennoa täyteen ladattuna. Kuvassa 5.7 mustalla piirretty käyrä on kennon impedanssi huoneenlämmössä, punaisella piirretty on 60°C:ssa ja sininen -20°C:ssa. Kuvasta nähdään, että lämpötilan kasvaessa ohminen resistanssi R_e ja varauksensiirtoresistanssi pienenevät. -22°C impedanssikäyrä poikkeaa muista niin huomattavasti, että se osoittaa jo huomattavaa muutosta kemiallisesti.

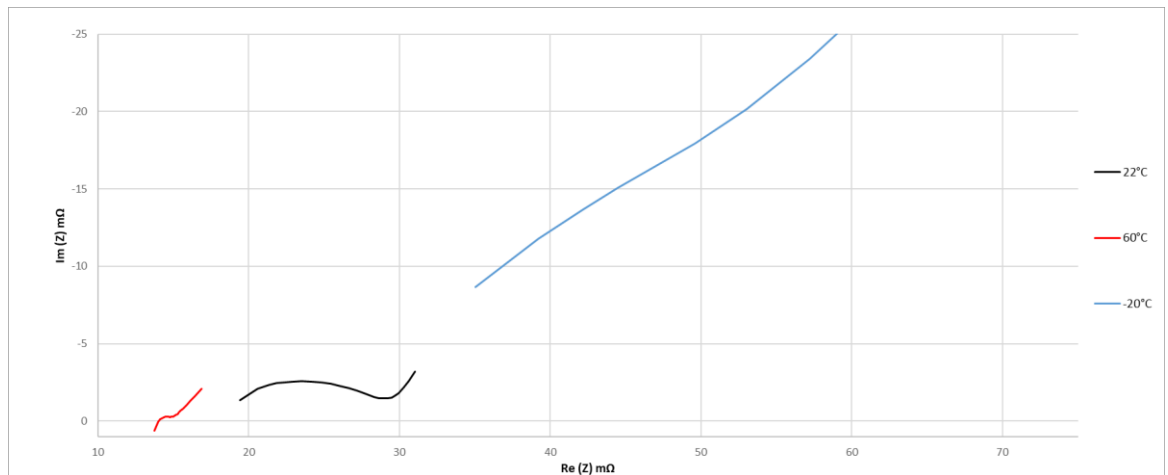


Kuva 5.7 LFP-kennon impedanssi täytenä, eri lämpötiloissa

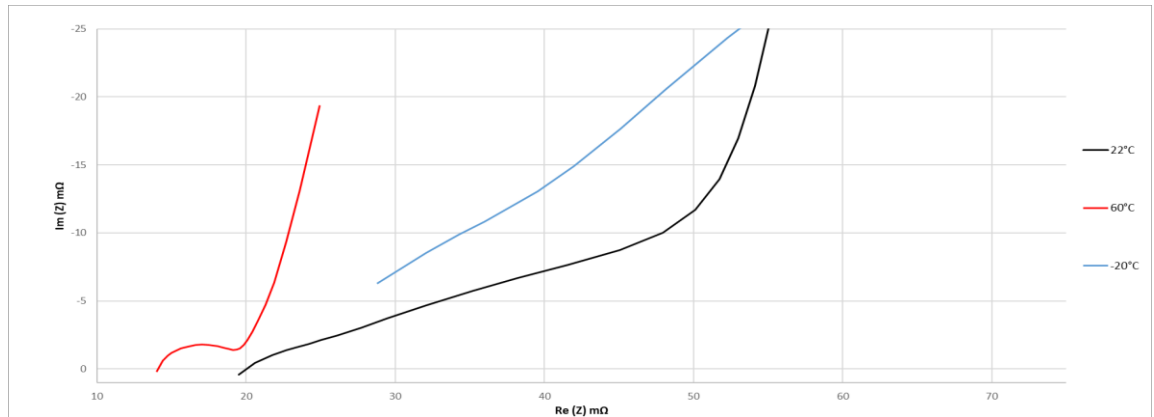
Kuvista 5.8, 5.9 ja 5.10 nähdään, että lämpötilan kasvaessa R_e ja R_{ct} pienenevät riippumatta varaustasosta. LFP-kennoilla varaustason aleneminen ei vaikuttanut R_e arvoihin kuin minimaalisesti



Kuva 5.8 LFP-kennon impedanssi varaustasolla 80 %, eri lämpötiloissa



Kuva 5.9 LFP-kennon impedanssi varaustasolla 60 %, eri lämpötiloissa



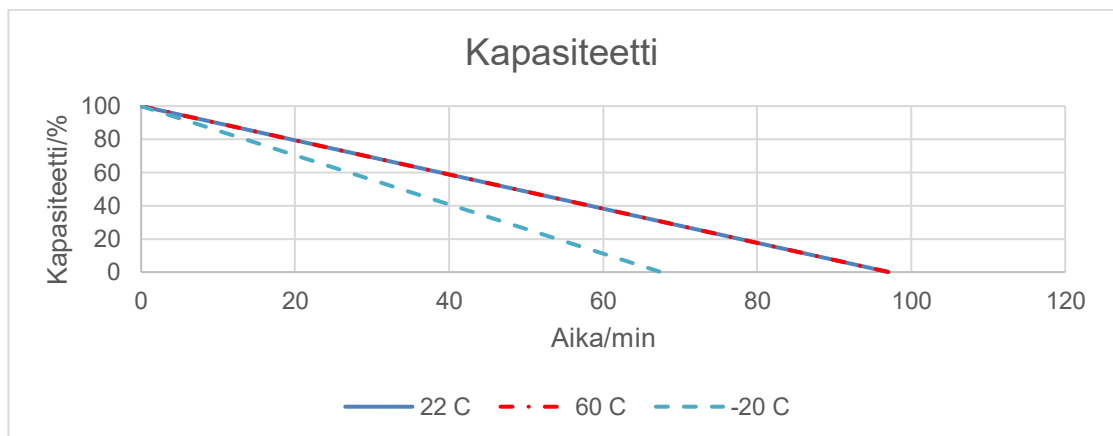
Kuva 5.10 LFP-kennon impedanssi tyhjänä, eri lämpötiloissa

5.3 LMO-kennojen vertailu ja pohdinnat

Kapasiteetti

LMO-kennojen purkaminen eri lämpötiloissa vaikutus kennon kapasiteettiin on kuvassa 5.11. 60°C:ssa purettu kenno piti kapasiteetin verrattuna huoneenlämmössä purettuna.

-20°C:ssa purettu kenno menetti yli 30 % kapasiteetistaan.



Kuva 5.11: Kennon kapasiteetti purku ajan suhteen

Impedanssi

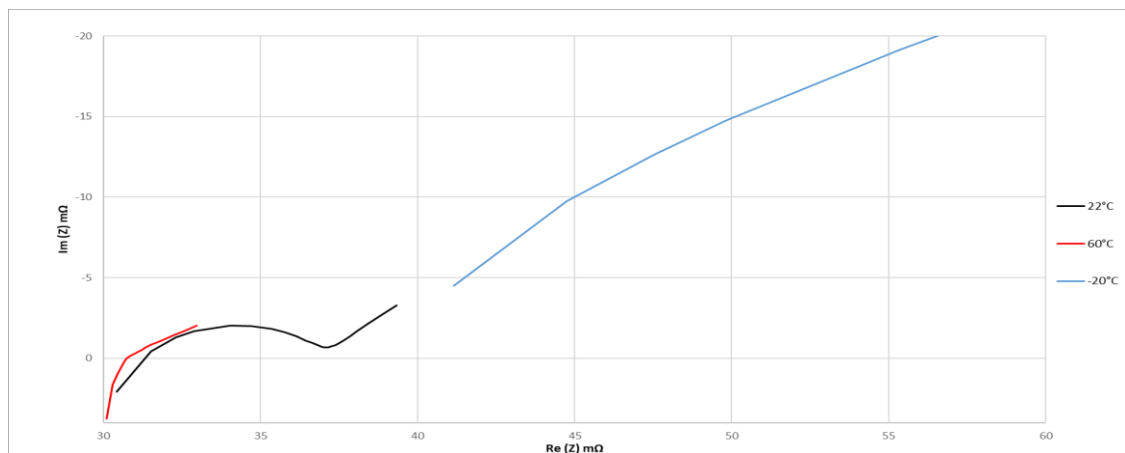
LMO-kenno täytenä

LMO-kennot ladattiin huoneenlämmössä ja sijoitettiin sääkaappiin. Kuumassa ja kylmässä tilassa ennen mittausten alkua, kennoja pidettiin sääkaapissa kahden tunnin ajan.

Kuvassa 5.12 nähdään täytenä olevien kennojen impedanssit eri lämpötiloissa, kuva on yhdistetty kuvista, jotka löytyvät liitteestä 3 (kuva 1), liitteestä 6 (kuva 1) ja liitteestä 9 (kuva 1).

Impedanssikäyrä lämpimässä näyttää, että kemialliset ominaisuudet kärsivät, R_e arvo säilyy samana kuin huoneenlämmössä mutta R_{ct} arvoa ei pysty edes arvioimaan.

Kylmässä tilassa mitattu impedanssikäyrä näyttää myös kemiallisten ominaisuuksien heikentymistä. R_e nousee selkeästi ja R_{ct} arvo kasvaa myös erittäin paljon. Impedanssin kasvu ovat seurausta kennon kunnan heikentymisestä (9).

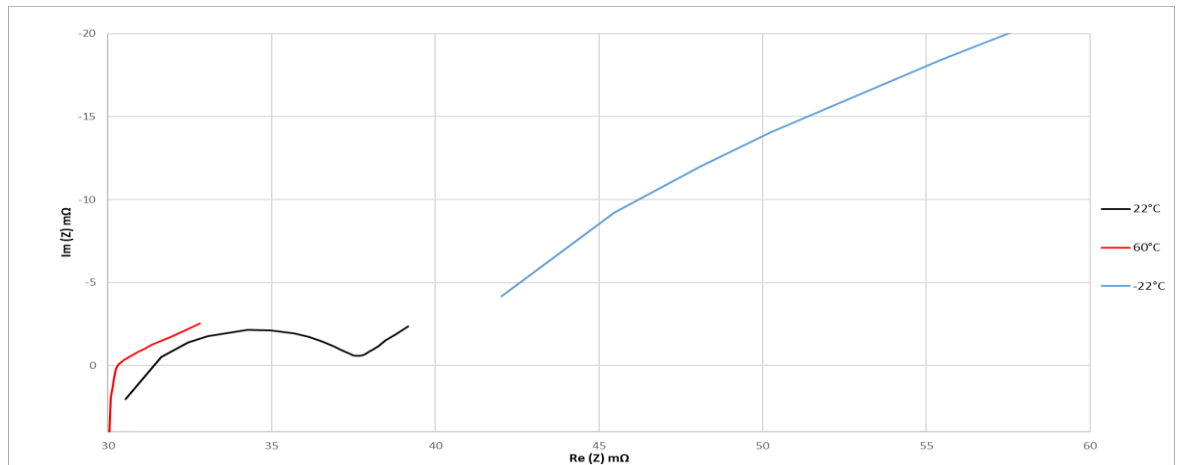


Kuva 5.12 LMO-kennon impedanssi varaustasolla 100 %, eri lämpötiloissa

LMO-kennoa purettu 20 %

Kuvasta 5.13 nähdään kennojen impedanssit eri lämpötiloissa, kun kennoja on purettu 20 %. Kuva on yhdistetty kuvista, jotka löytyvät liitteestä 3 (kuva 2), liitteestä 6 (kuva 2) ja liitteestä 9 (kuva 2).

Suurta muutosta edelliseen mittaukseen ei tässä ole tapahtunut, R_e säilynyt samana ja R_{ct} :n huippuarvo, on lämpimässä hieman suurempi ja kylmässä hieman pienempi.



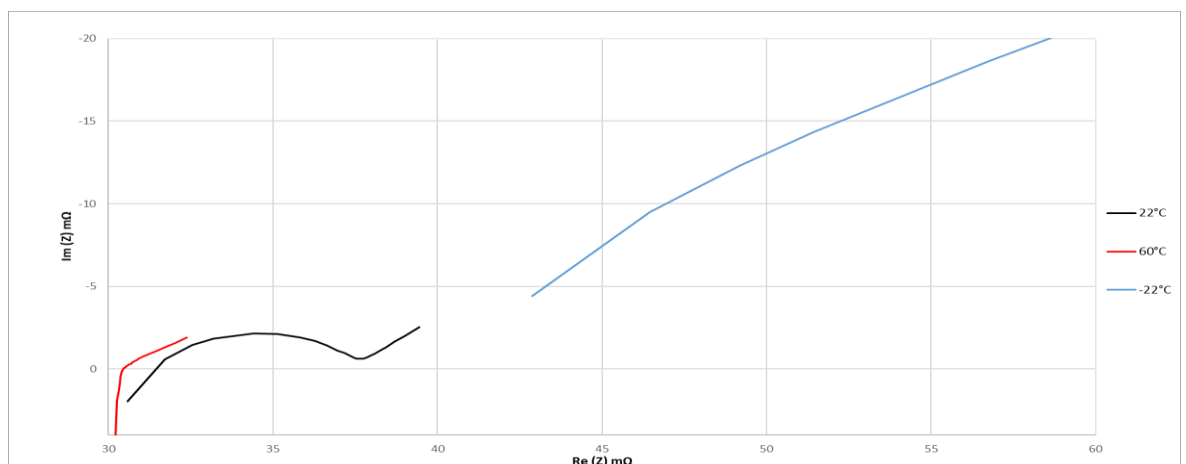
Kuva 5.13 LMO-kennon impedanssi varaustasolla 80 %, eri lämpötiloissa

LMO-kennoa purettu 40 %

Kuvasta 5.14 nähdään kennojen impedanssit eri lämpötiloissa, kun kennoja on purettu 40 %. Kuva on yhdistetty kuvista, jotka löytyvät liitteestä 3 (kuva 3), liitteestä 6 (kuva 3) ja liitteestä 9 (kuva 3).

Suurta muutosta edelliseen mittaukseen ei tässä ole tapahtunut:

- Lämpimässä R_e lähtee hieman kasvamaan ja R_{ct} :n huippuarvo jatkaa suurenmista hieman.
- Kylmässä ei tapahdu juuri muutosta



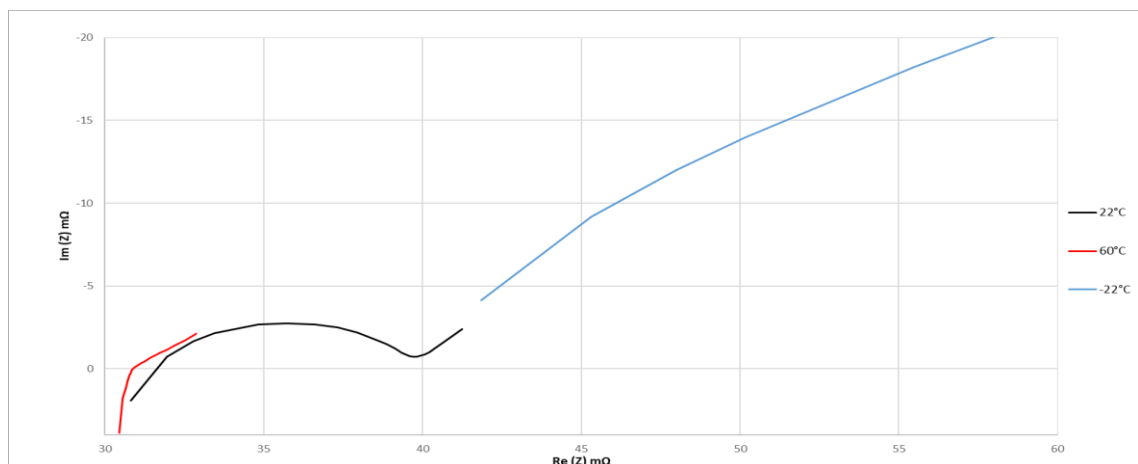
Kuva 5.14 LMO-kennon impedanssi varaustasolla 60 %, eri lämpötiloissa

LMO-kennoa purettu 60 %

Kuvasta 5.15 nähdään kennojen impedanssit eri lämpötiloissa, kun kennoja on purettu 60 %. Kuva on yhdistetty kuvista, jotka löytyvät liitteestä 3 (kuva 4), liitteestä 6 (kuva 4) ja liitteestä 9 (kuva 4).

Lämpimässä suurta muutosta edelliseen mittaukseen ei tässä ole tapahtunut R_e lähtee kasvamaan edelleen ja R_{ct} :n huippuarvo jatkaa suurenemista hieman.

Kylmässä tilassa olevat kennot tyhjenivät puolessa välissä tätä purkua, eli kun SOC oli n. 50 %, kennot olivat tyhjä, impedanssissa ei juuri muutoksia näkynyt mittausten keskeisessä. Impedanssikäyrän muodosta voidaan kuitenkin päätellä, että kemialliset muutokset kennon sisällä olivat suuria ja tästä syystä myös kapasiteettiin seurasi suuri pudotus.

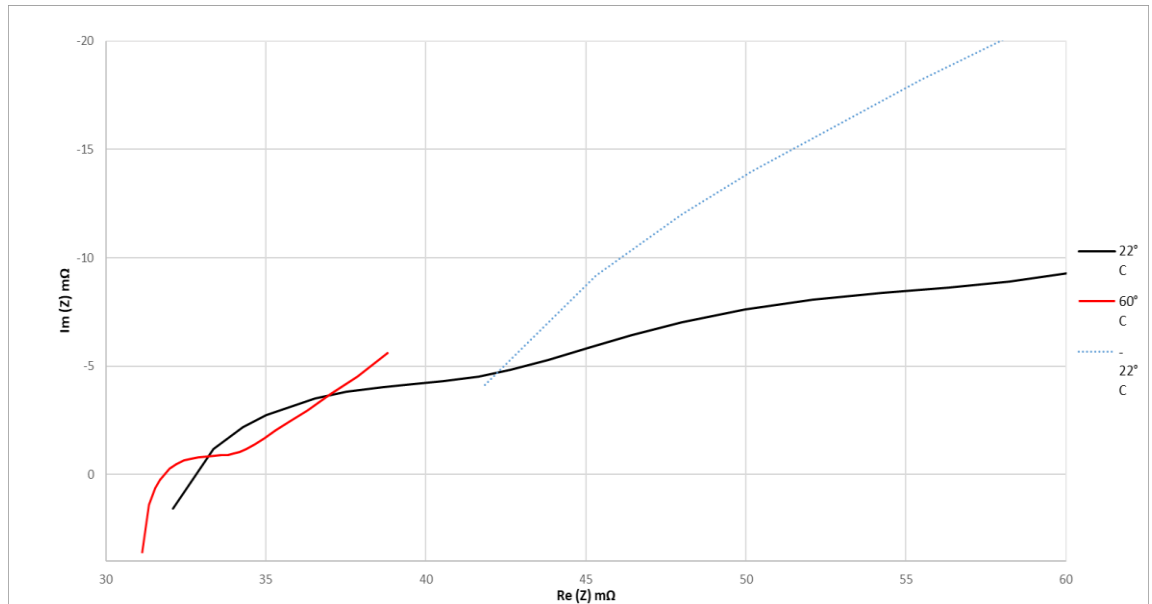


Kuva 5.15 LMO-kennon impedanssi varaustasolla 40 %, eri lämpötiloissa

LMO-kennoa purettu 80 %

Kuvasta 5.16 nähdään kennojen impedanssit eri lämpötiloissa, kun kennoja on purettu 80 %. Kuva on yhdistetty kuvista, jotka löytyvät liitteestä 3 (kuva 5) ja liitteestä 6 (kuva 5). Kuvaan jätettiin myös aiemmin tyhjentyneen kennon käyrä liitteestä 9 (kuva 4).

Lämpimässä pientä muutosta edelliseen mittaukseen alkaa tapahtunut R_e kasvaa ja R_{ct} -kaari alkaa hieman muodostua, R_{ct} huippuarvo pienenee hieman.

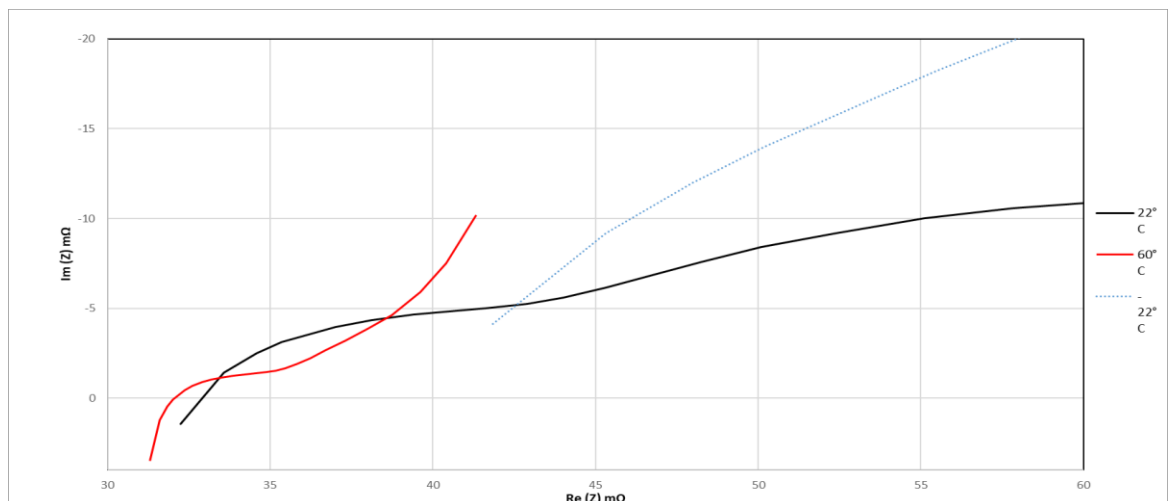


Kuva 5.16 LMO-kennon impedanssi varaustasolla 20 %, eri lämpötiloissa

LMO-kenno tyhjänä

Kuvasta 5.17 nähdään kennojen impedanssit eri lämpötiloissa, kun kennoja on purettu 100 %. Kuva on yhdistetty kuvista, jotka löytyvät liitteestä 3 (kuva 6) ja liitteestä 6 (kuva 6). Kuvaan jätettiin myös aiemmin tyhjentyneen kennon käyrä liitteestä 9 (kuva 4).

Lämpimässä sama muutos jatkuu edellisestä mittauksesta, R_e kasvaa ja R_{ct} -kaari edelleen samanlainen ja R_{ct} huippuarvo säilyy samana.



Kuva 5.17 LMO-kennon impedanssi varaustasolla 0 %, eri lämpötiloissa

6 YHTEENVETO

Litiumioniakut ovat erittäin laajasti käytössä lähes kaikissa langattomasti toimivissa sähkölaitteissa aina matkapuhelimista suuriin sähkömoottoreihin.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia litiumioniakkukenojen käyttäytymistä erilaisissa lämpötiloissa ja erilaisilla varaustasoilla. Mittauslämpötiloiksi valittiin valmistajan ilmoittamien turvallisten purkulämpötilojen alueelta, normaalin huoneenlämmön lisäksi, matalimmaksi lämpötilaksi -20°C ja korkeimmaksi lämpötilaksi 60°C .

Kennot ladattiin huoneenlämmössä, koska kennojen valmistajan tietojen mukaisesti, kennojen suositeltu latauslämpötila on aina huoneenlämpöä vastaava. Täyteen ladatut kennot sijoitettiin sääkaappiin, jossa akut lämmitettiin ja viilennettiin haluttuihin lämpötiloihin. Kennojen lataaminen ja purkaminen suoritettiin Croma 17011 Battery Cell Tester -laitteella, jolla saatiin lisäksi myös mittaustuloksia jännitteistä, virrasta, kapasiteetista ja lämpötiloista. Kennon kunnon (SOH) arviointia varten mitattiin impedanssimittarilla kennojen impedanssi täytenä sekä purkamisen aikana 20 %:n välein.

Mittaustuloksista selviää, että lämmön lasku vaikuttaa kennon kapasiteettia alentavasti, riippuen kennon kemiallisesta koostumuksesta vaikutus vaihtelee n. 10 % – 40 %. Lämmön nousulla oli havaittavissa kapasiteettiin pieni heikentävä vaikutus.

Vaikutukset kennoon olivat impedanssi mittauksessa selkeästi huomattavissa, ja lämpötilan laskiessa impedanssi kasvaa selkeästi. Impedanssin kasvaminen johtaa kapasiteetin, virran ja tehon laskuun [19].

Kennon kuntoon (SOH) vaikuttavista asioista kapasiteetin pieneneminen ja impedanssin kasvu ovat seurausta kennon kunnon heikentymisestä. Varsinkin kylmässä testatuissa kennoissa impedanssi poikkesi alkuperäisestä todella huomattavasti ja näkyi myös kapasiteettimittausten osalta selkeänä kapasiteetin pienenemisenä. Impedanssimittaukset osoittivat myös kaikissa kemioissa suurta kemiallisen koostumuksen muutosta. Litiumakut ovat tunnetusti huonoja kestäämään kylmää, ja mittaustulokset osoittivat sen selvästi.

Kuumassa tilassa eri kemian omaavat kennot toimivat eri tavoin. LTO-kennot säilyttivät parhaiten kemialliset ominaisuutensa ohmisen resistanssin pienentyessä vain hieman ja varauksensiirtoresistanssin pienentyessä.

LFP-kennojen ohminen resistanssi ja varauksensiirtoresistanssi pienentyivät huomattavasti. Lisäksi eri kennoilla oli suurta keskinäistä vaihtelua kapasiteetissa.

LMO-kennojen kemialliset ominaisuudet kärsivät selvästi eniten kuumassa tilassa ja myös kylmässä tilassa oli huomattavissa selvä heikentyminen, kennot olivat tyhjiä, kun SOC oli 50 %.

LTO-kennoissa oli testatuista kennoista selkeästi matalin sisäinen impedanssi, josta seuraa hyvä kyky luovuttaa ja vastaanottaa energiaa.

Akkujen lämpötilan hallitseminen on tutkimuksen perusteella erittäin tärkeää, koska työssä selvitetty lämpötilan muutokset vaikuttavat kennojen kemiallisiin ominaisuuksiin suuresti. Näiden tulosten perusteella odotettavissa on kennojen ominaisuuksien huomattavasti nopeampaa heikentymistä käytettäessä kennoja näissä lämpötiloissa.

Sääkaappia ei voitu jättää päälle ilman valvontaa, joten lämmityksen ja viilentämisen aikarajana oli se, että kaikki kyseisen lämpötilan mittaukset oli tehtävä saman päivän aikana. Pidempi aika kyseisessä lämpötilassa olisi ollut parempi, jotta kennojen lämpötila olisi ollut varmasti tasainen. Lisäksi kennojen poistaminen sääkaapista mittauksia varten aiheutti muutosta lämpötilaan, joten impedanssi mittaukset olisi ollut hyvä pystyä suorittamaan kaapin sisällä ja mielellään ilman oven avausta.

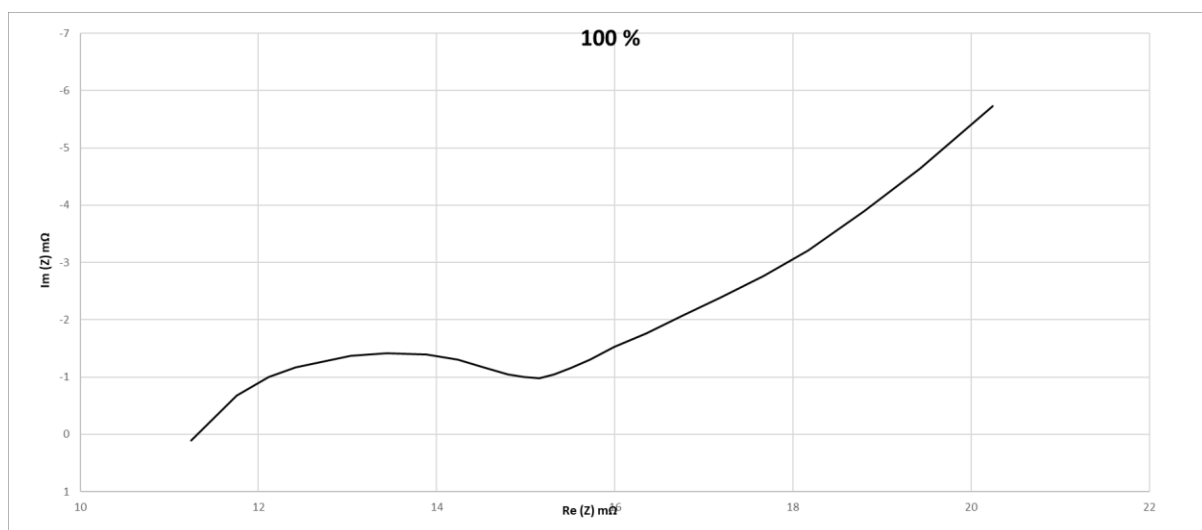
Työn jatkamista ajatellen testattavaksi olisi myös hyvä lisätä rakenteeltaan ja teholtaan erilaisia akkukennoja. Mittauksia voisi tehdä lisää eri lämpötiloissa. Tässä tutkimuksessa valitut lämpötilat olivat huoneenlämmön lisäksi käyttöalueen ääripäistä eli 60 °C ja -20 °C. Mielenkiintoista olisi mitata vielä esimerkiksi -10°C, 0°C, 30°C ja 40°C, jolloin saataisiin tyypillisimmät käyttölämpötilat testattua ja mahdolliset vaikutukset käytännön käyttölämpötiloissa tulisi katettua.

LÄHTEET

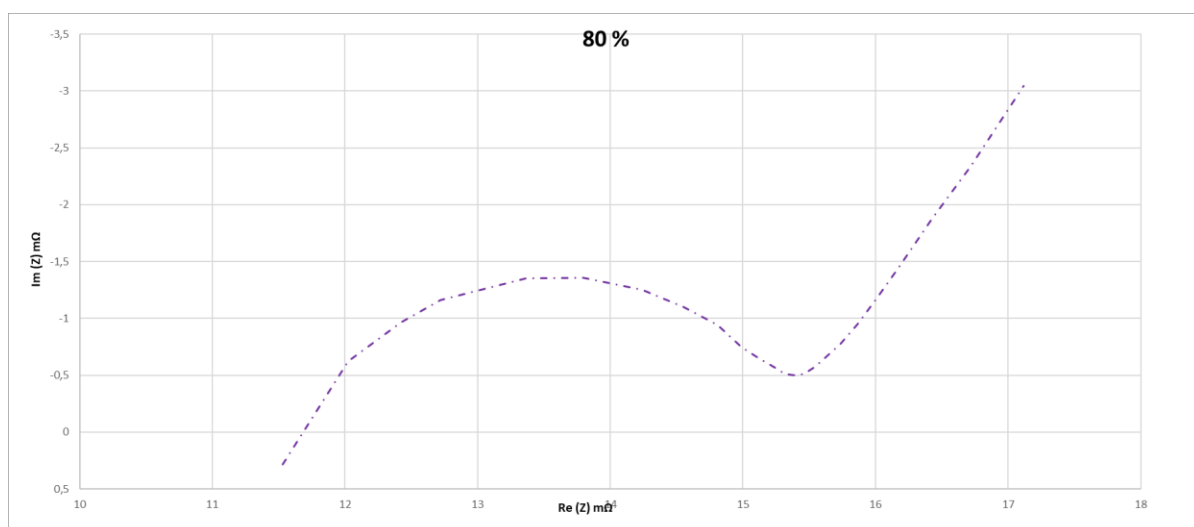
- [1] Franco, A. & Appetecchi. G. Rechargeable lithium batteries : from fundamentals to applications. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, an imprint of Elsevier; 2015. 412 s. ISBN 978-1-78242-090-3, s.6.
- [2] Pistoia G. Lithium-ion batteries : advances and applications. First edition ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier; 2014, 664 s. ISBN 978-0-444-59513-3.
- [3] Holm T. Litiumioniakuston matalat lämpötilat huomioiva impedanssimalli. Temperature depended impedance model of the lithium-ion battery pack for low temperatures 2014. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:ty-201403051109>, Viitattu 15.5.2020.
- [4] Guo, D.; Yang, G.; Zhao, G.; Yi, M.; Feng, X.; Han, X.; Lu, L.; Ouyang, M. Determination of the Differential Capacity of Lithium-Ion Batteries by the Deconvolution of Electrochemical Impedance Spectra. 2020. Saatavilla DOI: 10.3390/en13040915
- [5] Blomgren GE. The Development and Future of Lithium Ion Batteries. J Electrochem Soc 2016 -12-01;164(1):A5019.
- [6] Franco, A. & Appetecchi. G. Rechargeable lithium batteries : from fundamentals to applications. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, an imprint of Elsevier; 2015. 412 s. ISBN 978-1-78242-090-3
- [7] Jouppi E. Akkujärjestelmien turvallisuus. 2019; Saatavilla: <http://www.theseus.fi/handle/10024/266089>. Viitattu 23.5.2020.
- [8] Rukundo R. Litiumakkujen lataus, purku ja lämpötilakäyttäytyminen. 2017, Saatavilla: <http://www.theseus.fi/handle/10024/132184>. Viitattu 23.5.2020.
- [9] Mononen T. Akunhallintajärjestelmät, litiumakkujen lataus ja purkaus. 2018; Saatavilla: <http://www.theseus.fi/handle/10024/157240>. Viitattu 23.5.2020.
- [10] Pistoia G. Lithium-ion batteries : advances and applications. First edition ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier; 2014, 664 s. ISBN 978-0-444-59513-3
- [11] Zhang, Z. & Zhang, S. Rechargeable Batteries: Materials, Technologies and New Trends. 2015. ISBN 978-3-319-15458-9.
- [12] Buchmann I. BU-205: Types of Lithium-ion. 2019. Battery University. Saatavilla https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion. Viitattu 1.6.2020.
- [13] Illig, J. Physically based Impedance Modelling of Lithium-Ion Cells, Germany: KIT Scientific Publishing; 2014. 234 s. ISBN: 978-3-731-50246-3
- [14] Brief Introduction Lithium-ion Battery Working Principle. Saatavilla: <http://www.impbattery.com/news/brief-introduction-lithium-ion-battery-working-4651053.html>. Viitattu 15.6.2020.
- [15] Pistoia G. Lithium-ion batteries : advances and applications. First edition ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier; 2014. 664 s. ISBN: 978-0-444-59513-3

- [16] D. I. Stroe, M. Swierczynski, A. I. Stan, V. Knap, R. Teodorescu, S. J. Andreassen. Diagnosis of lithium-ion batteries state-of-health based on electrochemical impedance spectroscopy technique. 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2014. ISBN: 978-1-4799-5776-7. Saatavilla: 10.1109/ECCE.2014.6954027
- [17] Andre, D., Meiler, M., Steiner, K., Wimmer, Ch., Soczka-Guth, T. & Sauer, D.U. 2011. Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Experimental investigation. Journal of Power Sources 196 , s. 5334-5341. Saatavilla: doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.12.102
- [18] BRS Messtechnik GmbH, Fundamentals of Spectral Impedance. Saatavilla: <https://www.brs-messtechnik.de/english/grundlagen.html>. Viitattu 15.6.2020.
- [19] Liu, Ping & Zhang, Wenhua & Tan, Qingfeng & Liu, Xiaolei & Wu, Fayuan. (2018). Pro-gress of State of Health Evaluation Methods for Lithium-ion power Battery. IOP Confe-rence Series: Materials Science and Engineering. 452. 032033. 10.1088/1757-899X/452/3/032033.
- [20] Abad, G.. Power electronics and electric drives for traction applications. US: John Wiley & Sons, Incorporated; 2017. s.288
- [21] Galeotti M, Cinà L, Giammanco C, Cordiner S, Di Carlo A. Performance analysis and SOH (state of health) evaluation of lithium polymer batteries through electrochemical impedance spectroscopy. Energy 2015 September 1, 89:678-686.
- [22] Murashko K. Thermal modelling of commercial lithium-ion batteries. Lappeen-ranta University of Technology. 2016. Saatavilla: urn.fi/URN:ISBN:978-952-265-908-8
- [23] Blomgren, G. The Development and Future of Lithium Ion Batteries. J Electrochem Soc 2016. Saatavilla doi.org/10.1149/2.0251701jes
- [24] Alavi, S & Birkl, C. & Howey D. Time-domain fitting of battery electrochemical imped-ance models. Journal of Power Sources 201. s.345. Saatavilla doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.04.099

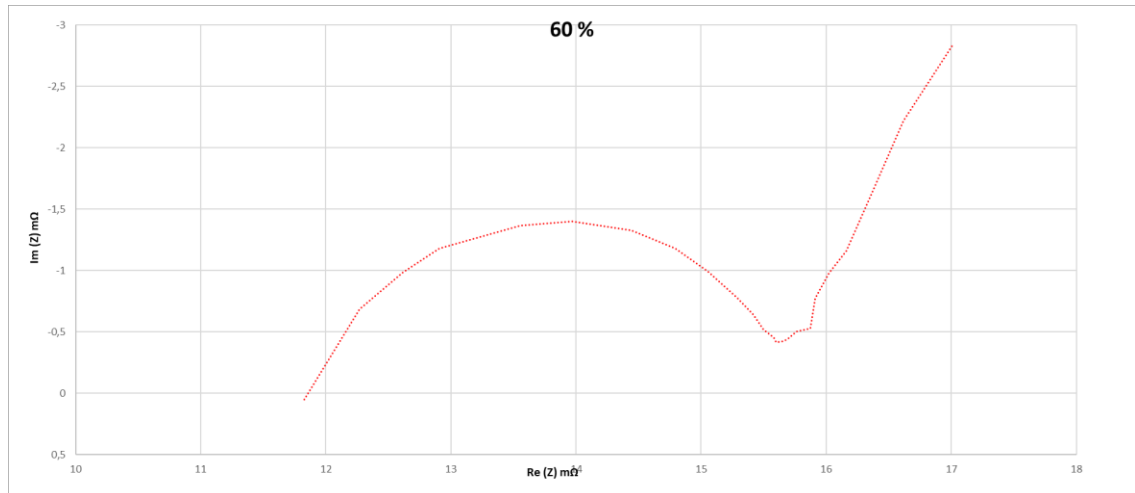
LTO-kenno: purku huoneenlämmössä



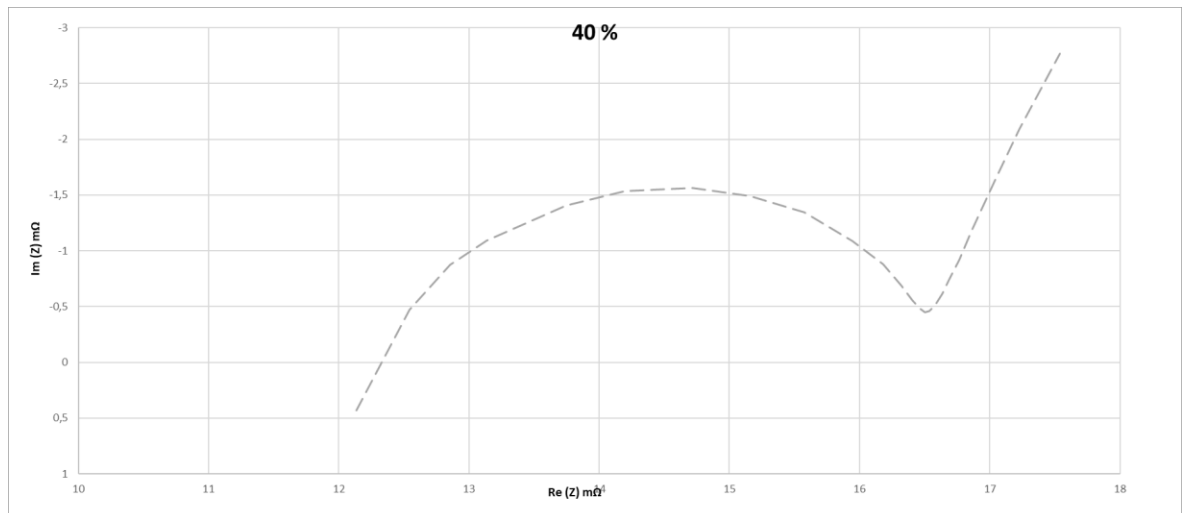
Kuva 1: LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 100 %



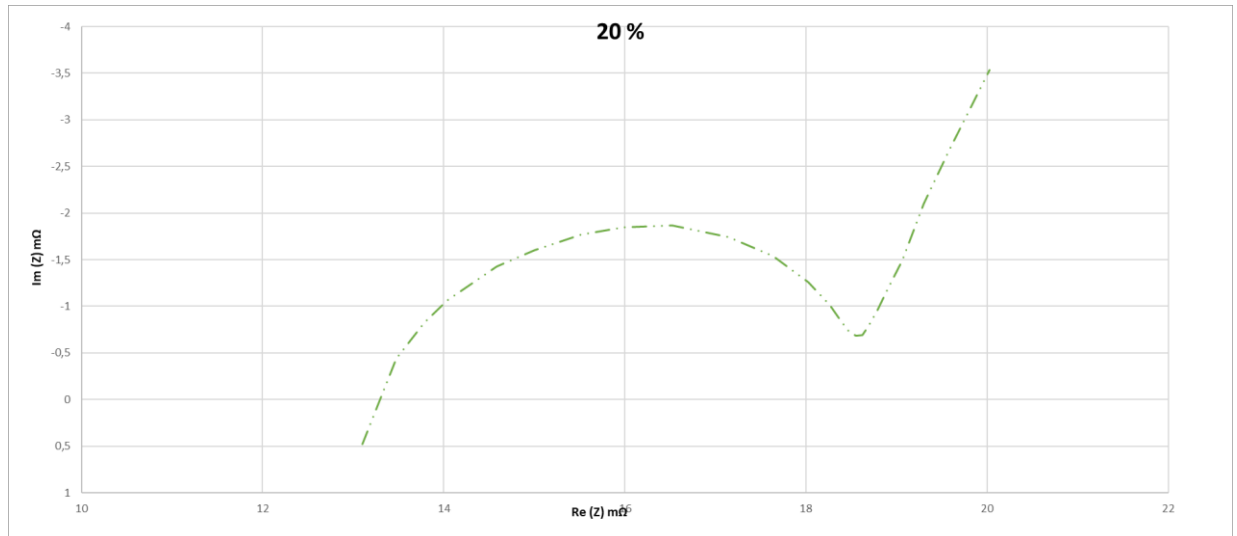
Kuva 2: LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 80 %



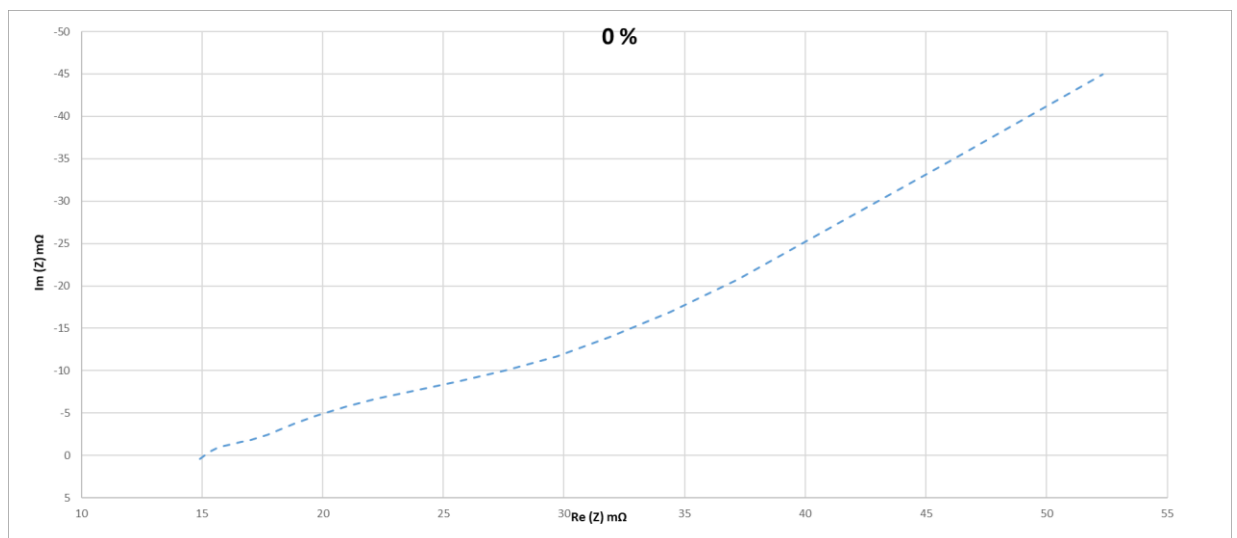
Kuva 3: LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 60 %



Kuva 4: LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 40 %

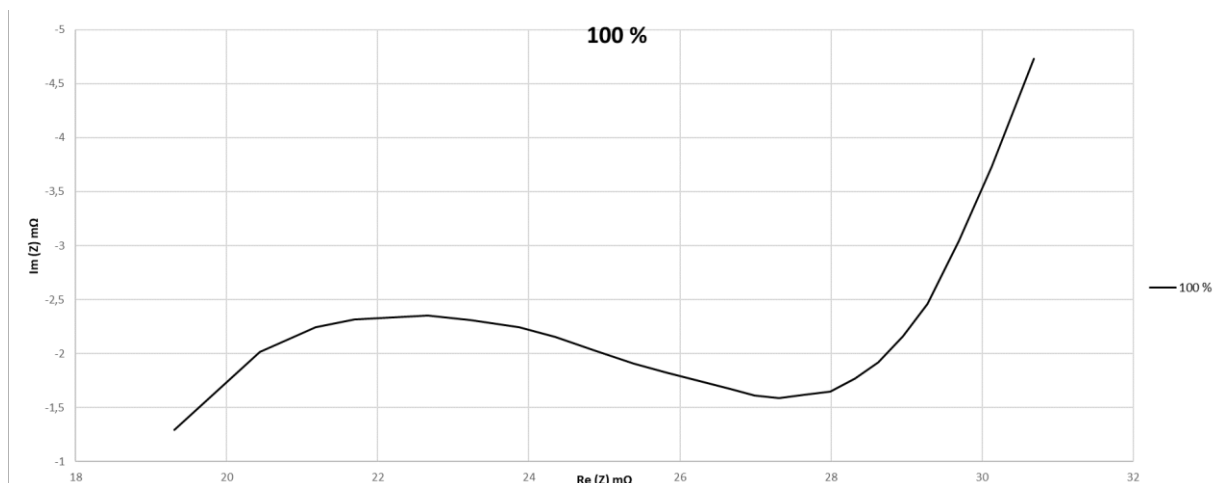


Kuva 5: LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 20 %

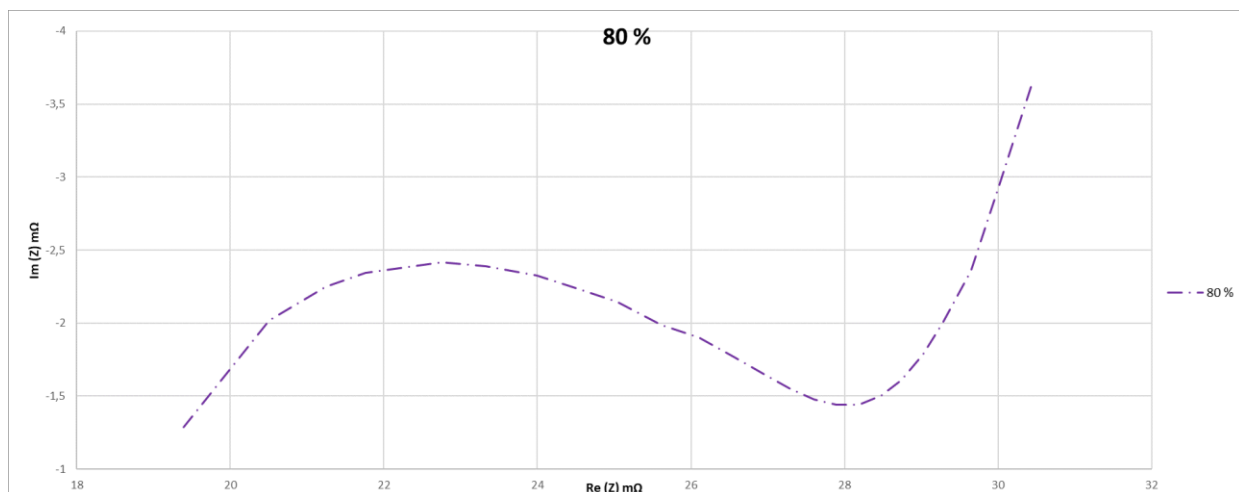


Kuva 6: LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 0 %

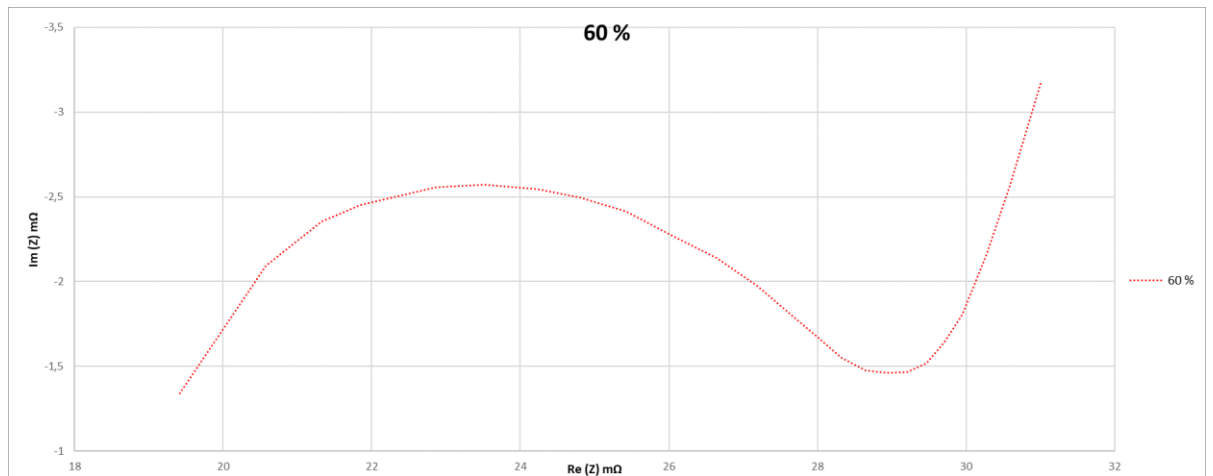
LFP-kenno: purku huoneenlämmössä



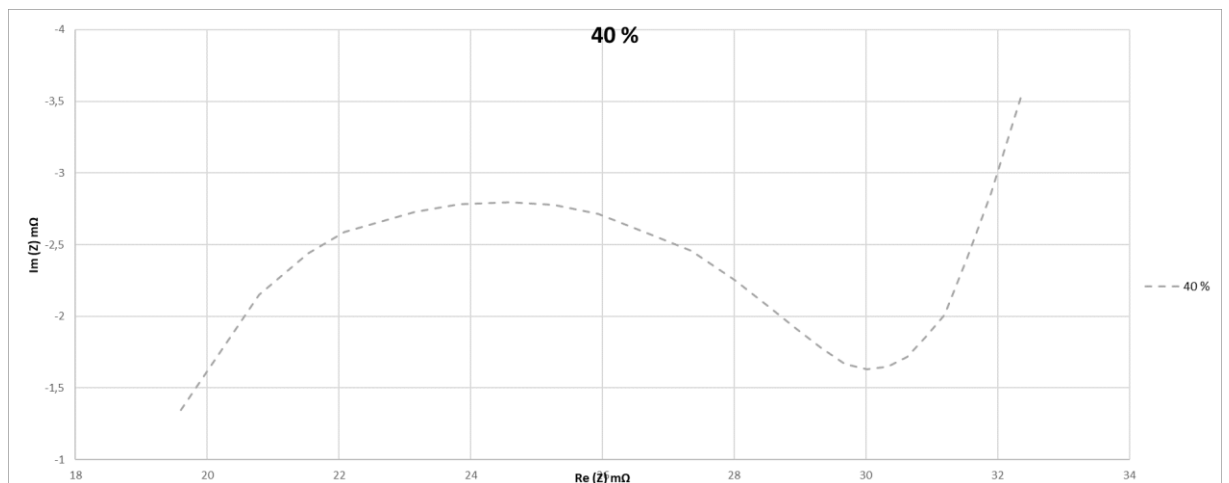
Kuva 1. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 100 %



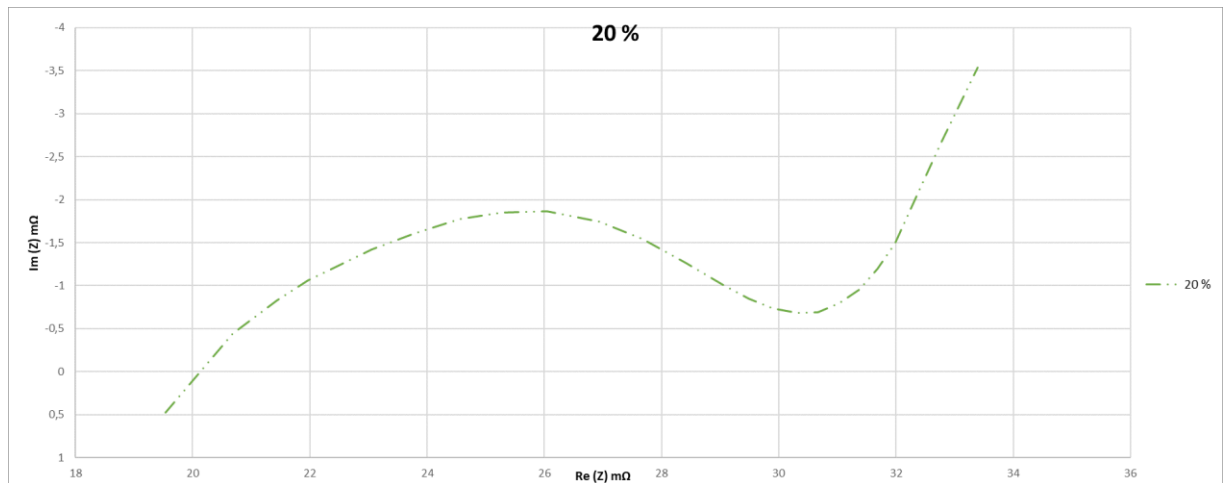
Kuva 2. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 80 %



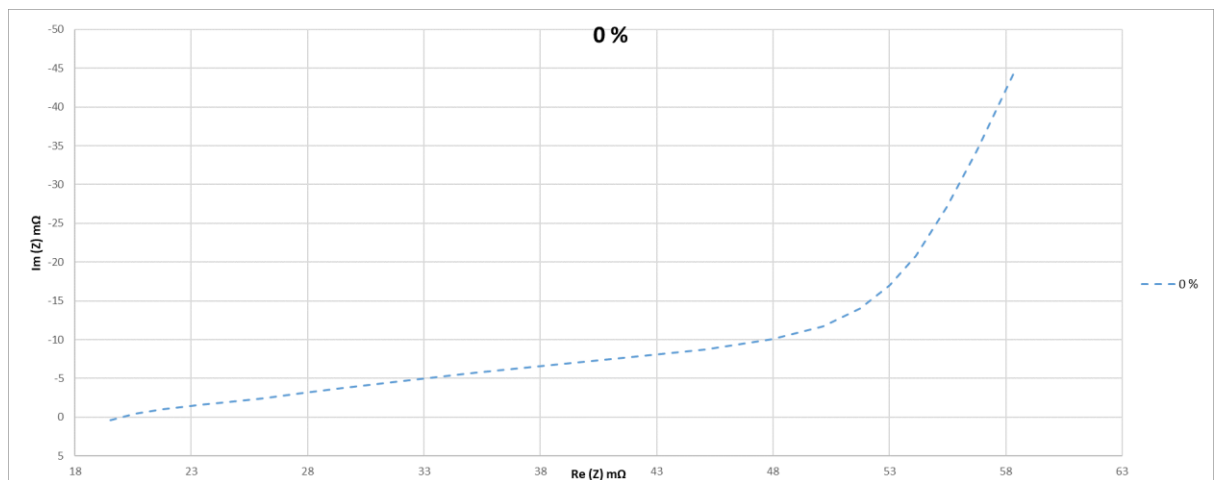
Kuva 3. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 60 %



Kuva 4. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 40 %

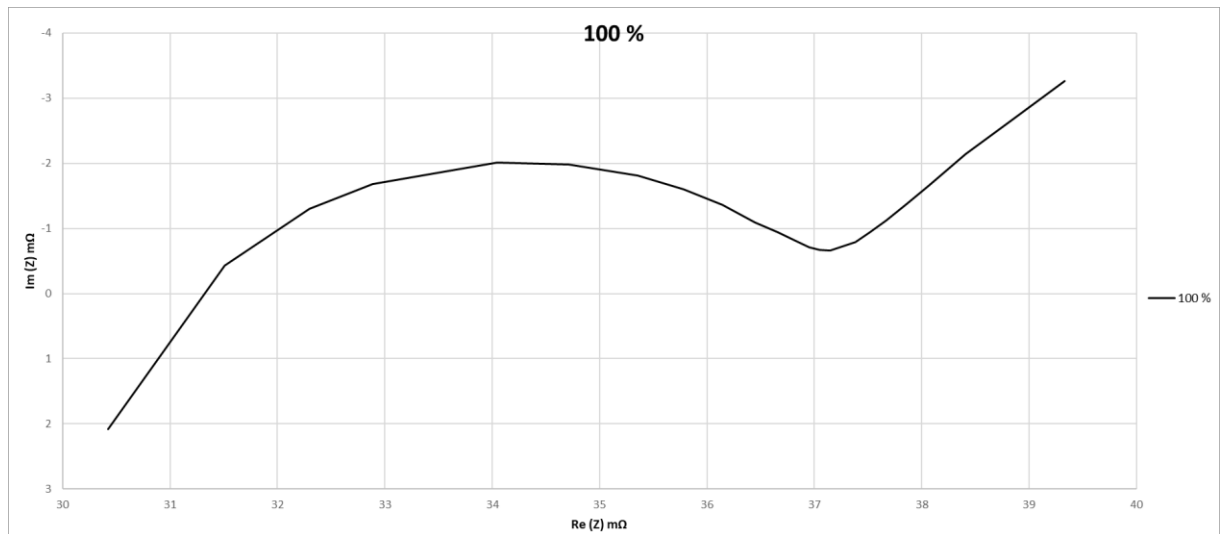


Kuva 5. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 20 %

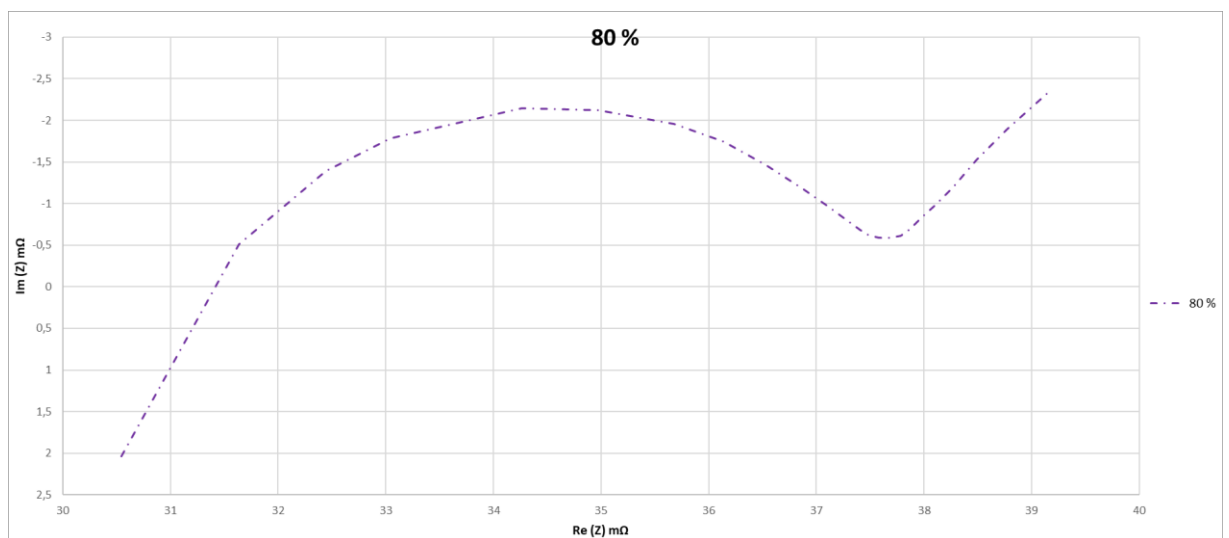


Kuva 6. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 0 %

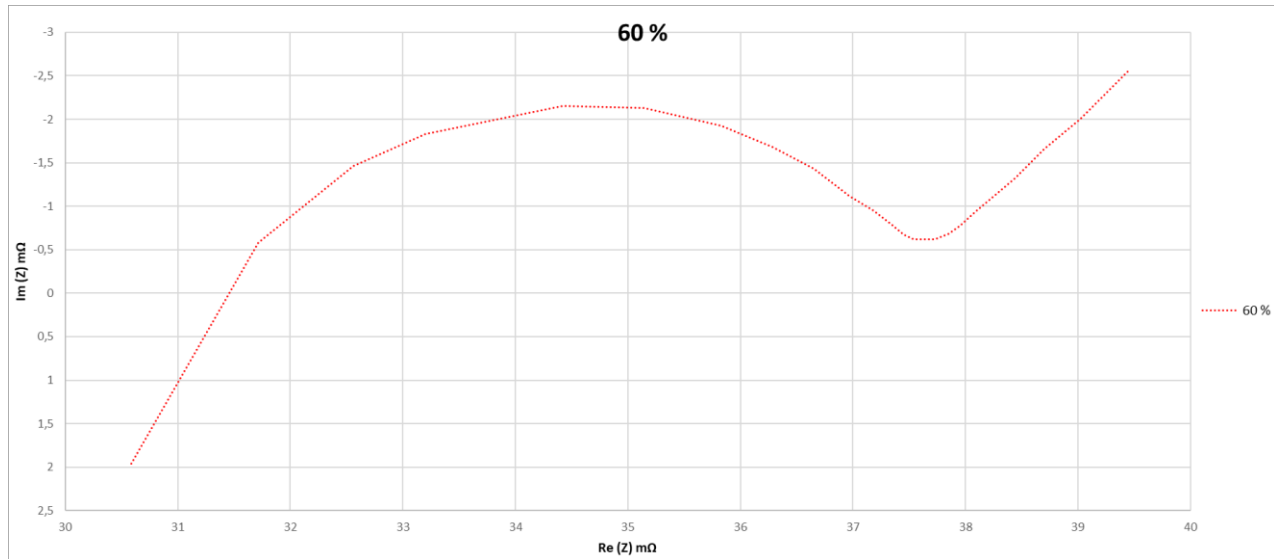
LMO-kenno: purku huoneenlämmössä



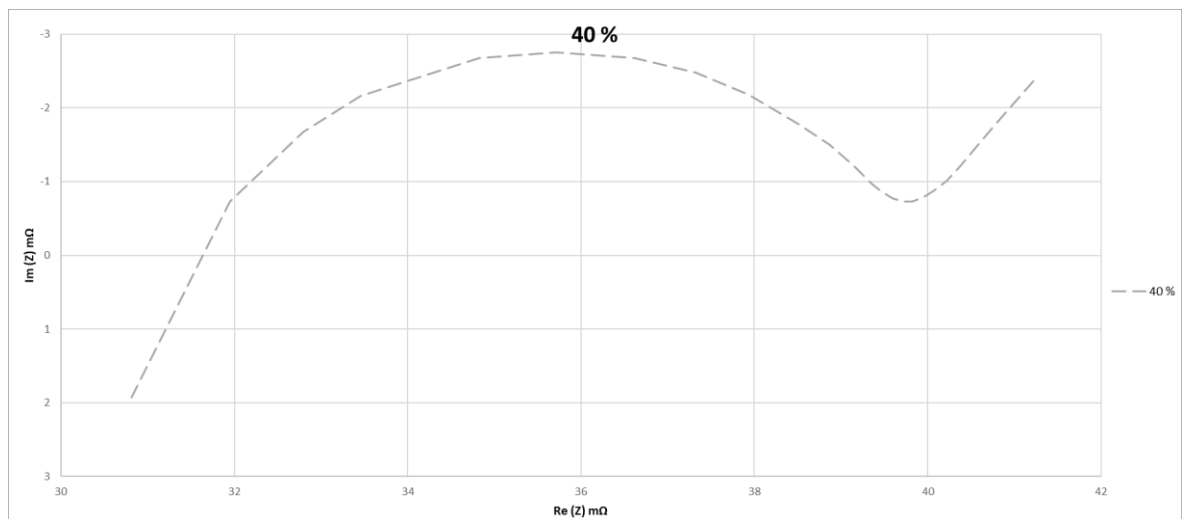
Kuva 1. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 100 %



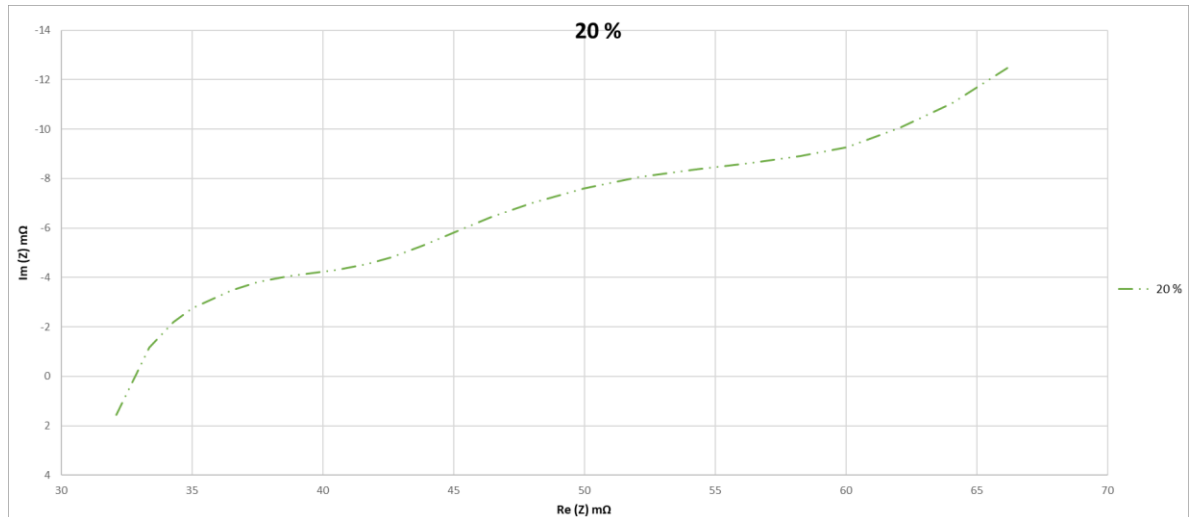
Kuva 2. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 80 %



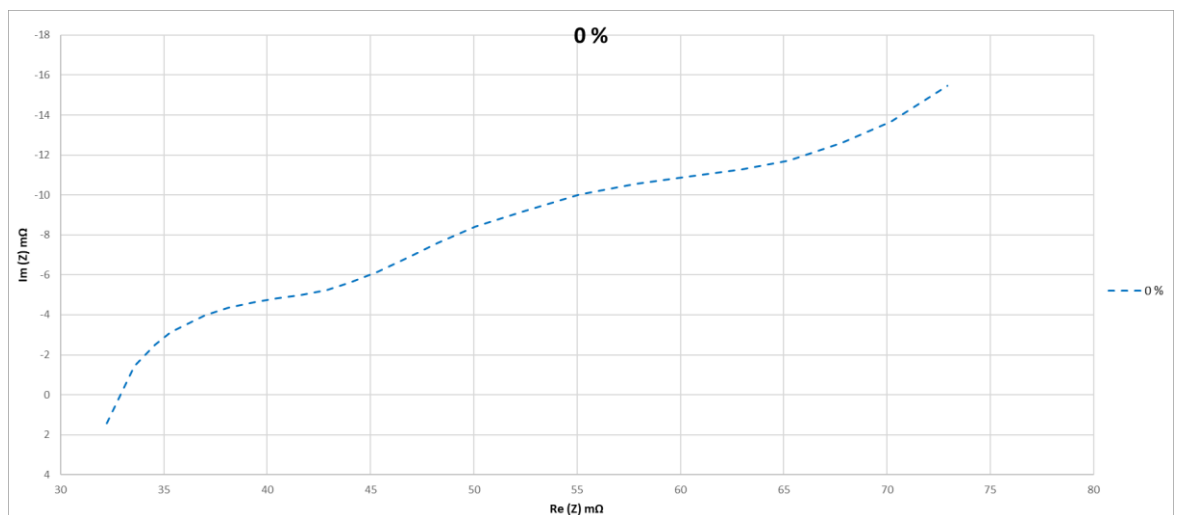
Kuva 3. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 60 %



Kuva 4. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 40 %

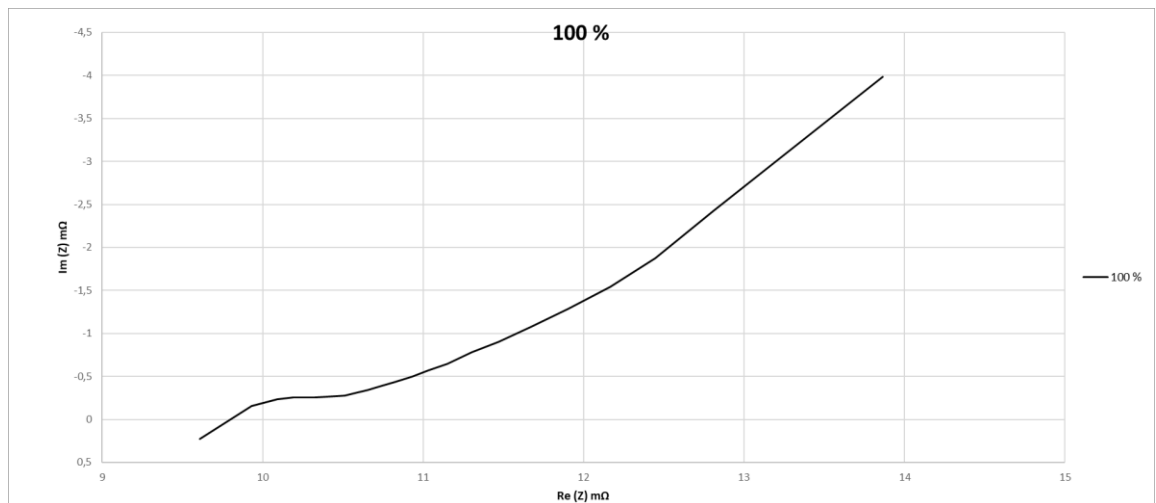


Kuva 5. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 20 %

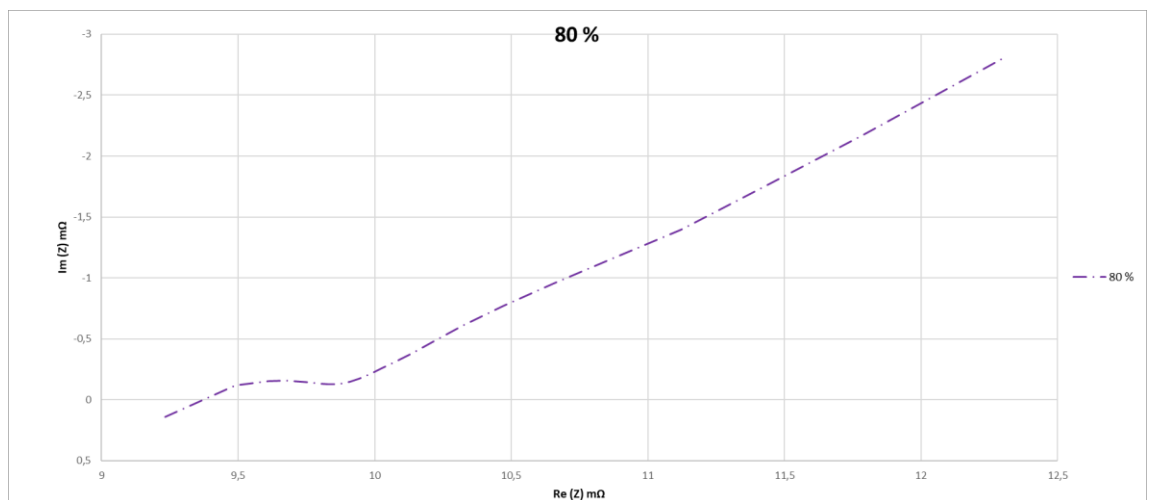


Kuva 6. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 0 %

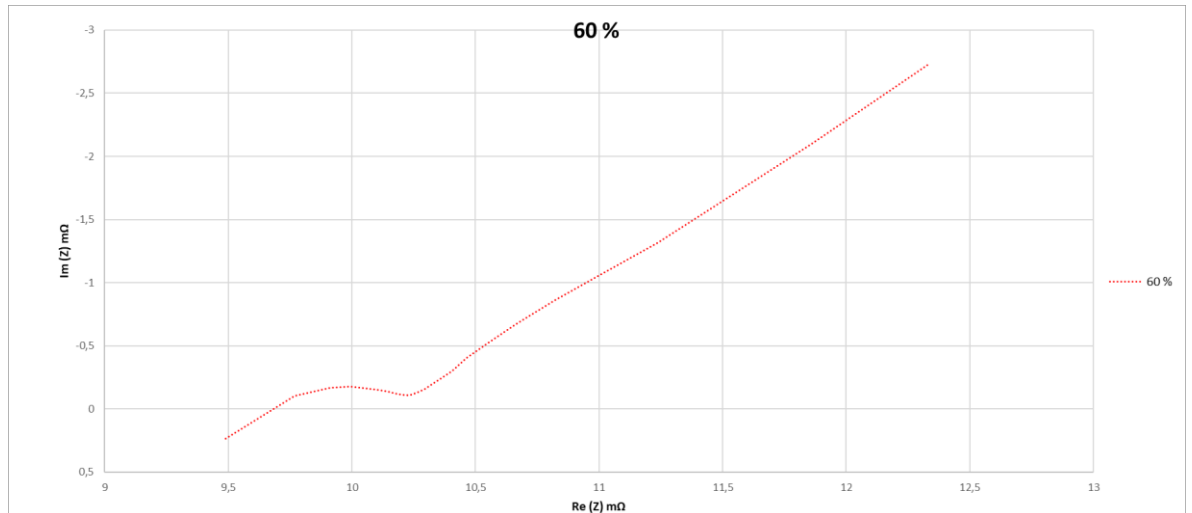
LTO-kenno: purku 60°C:ssa



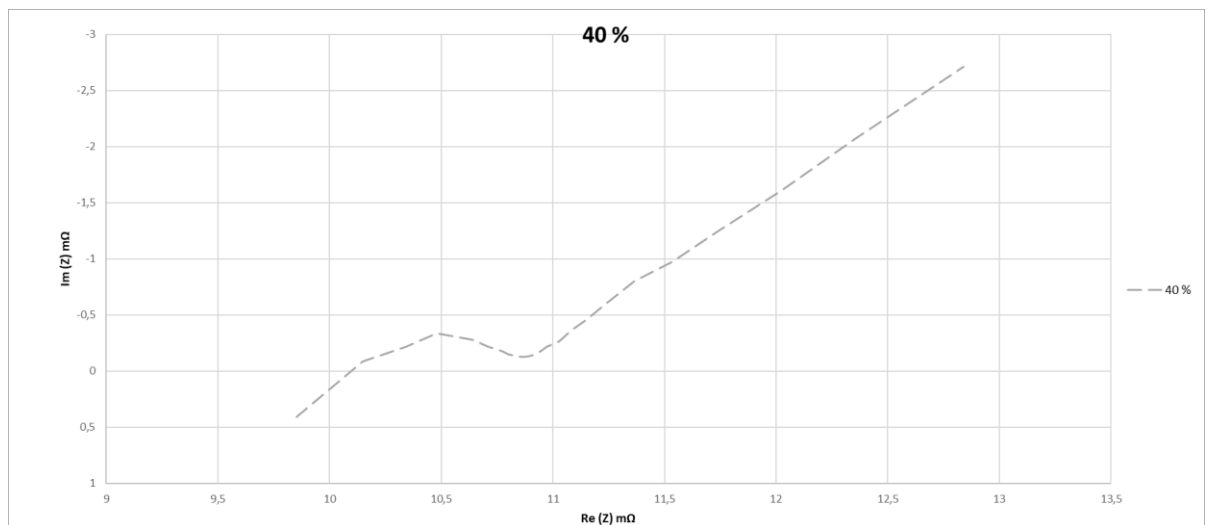
Kuva 1. LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 100 %



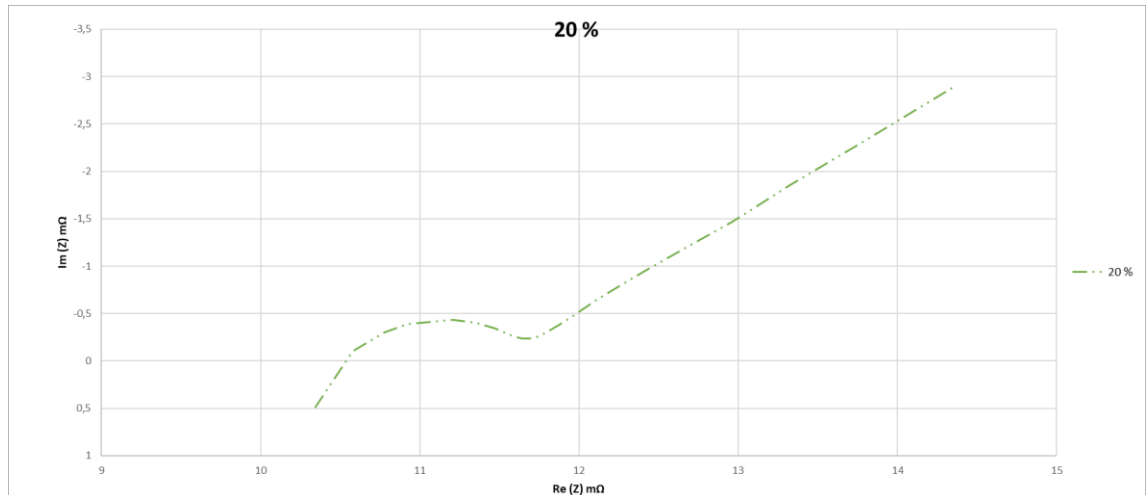
Kuva 2. LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 80 %



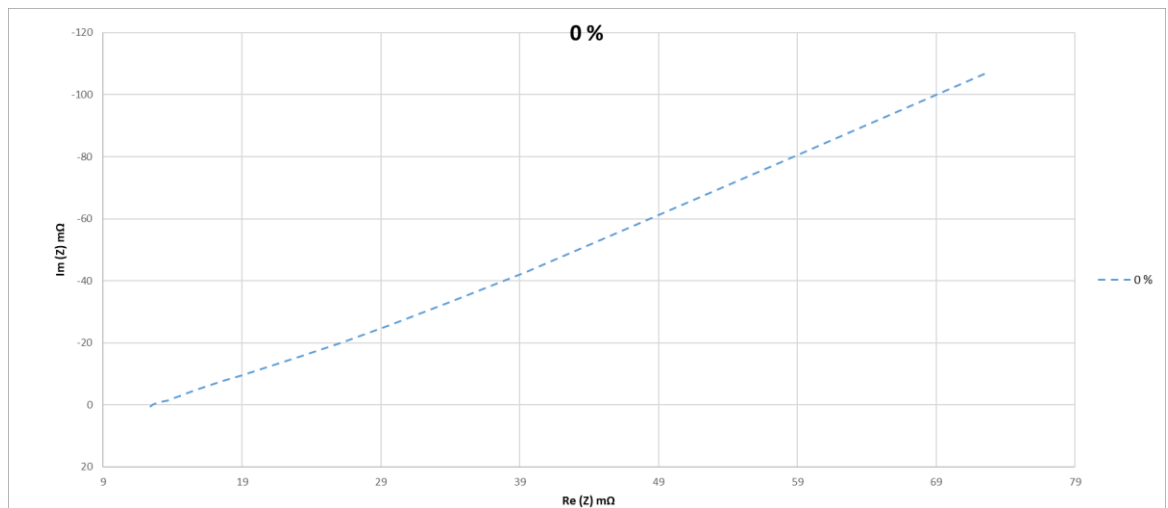
Kuva 3. LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 60 %



Kuva 4. LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 40 %

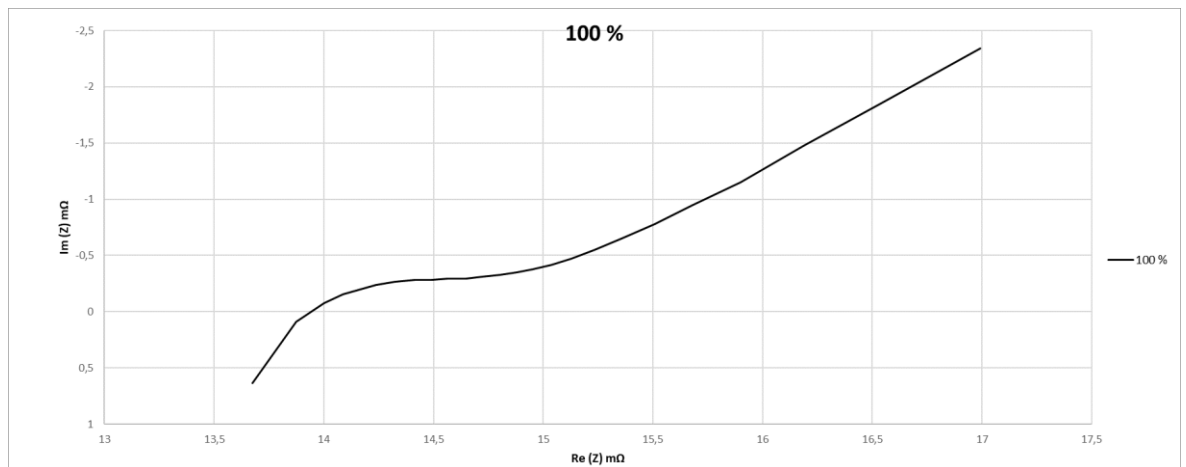


Kuva 5. LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 20 %

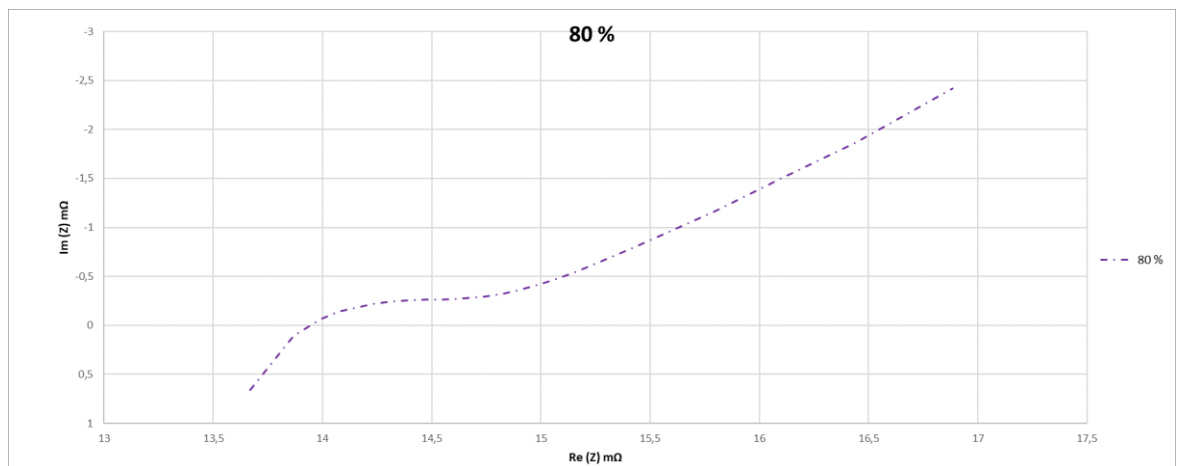


Kuva 6. LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 0 %

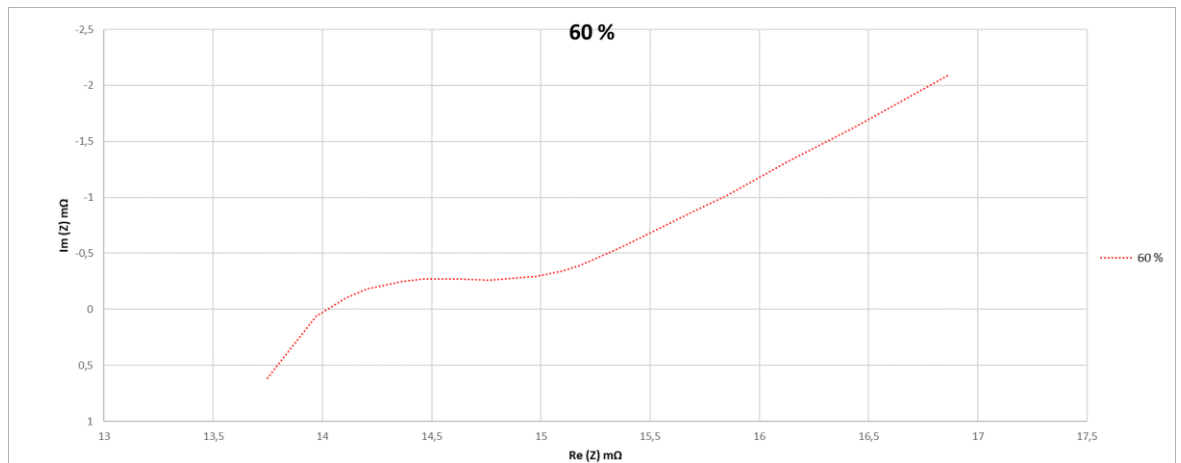
LFP-kenno: purku 60°C:ssa



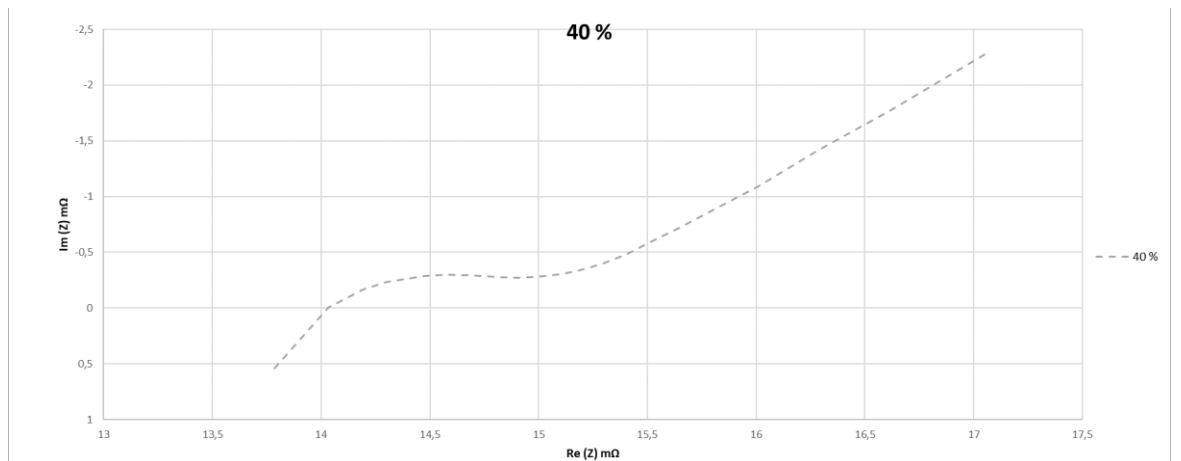
Kuva 1. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 100 %



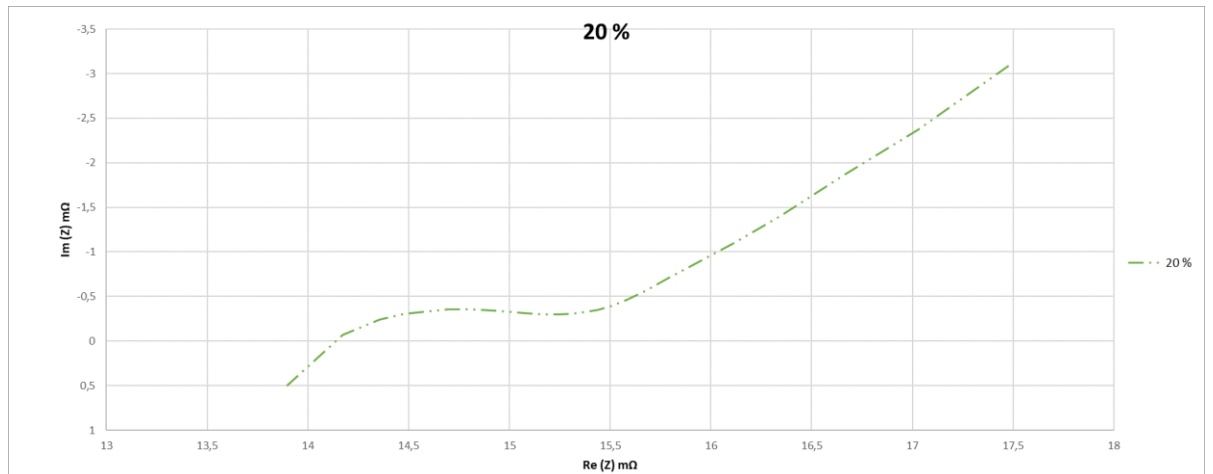
Kuva 2. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 80 %



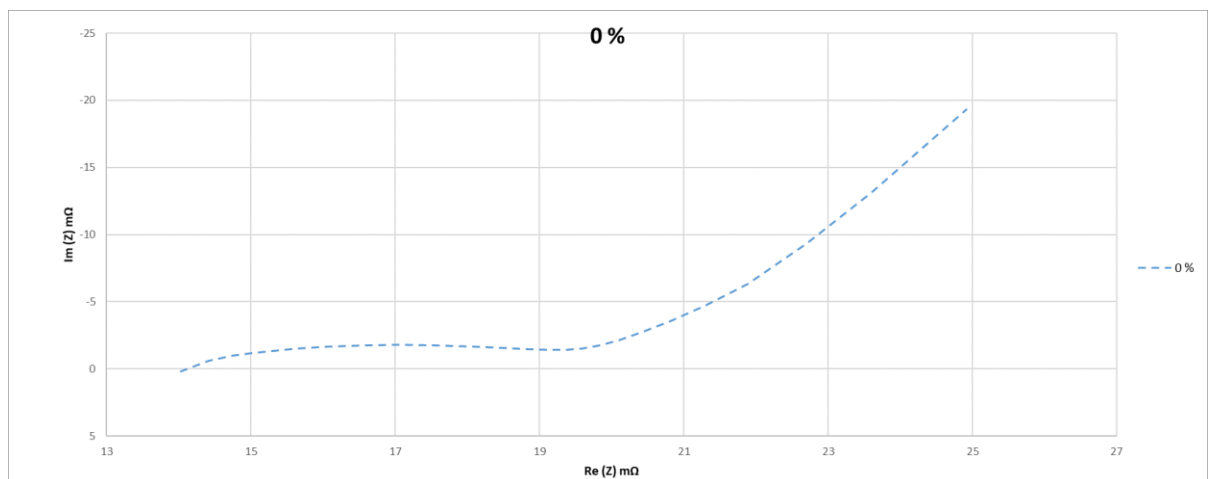
Kuva 3. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 60 %



Kuva 4. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 40 %

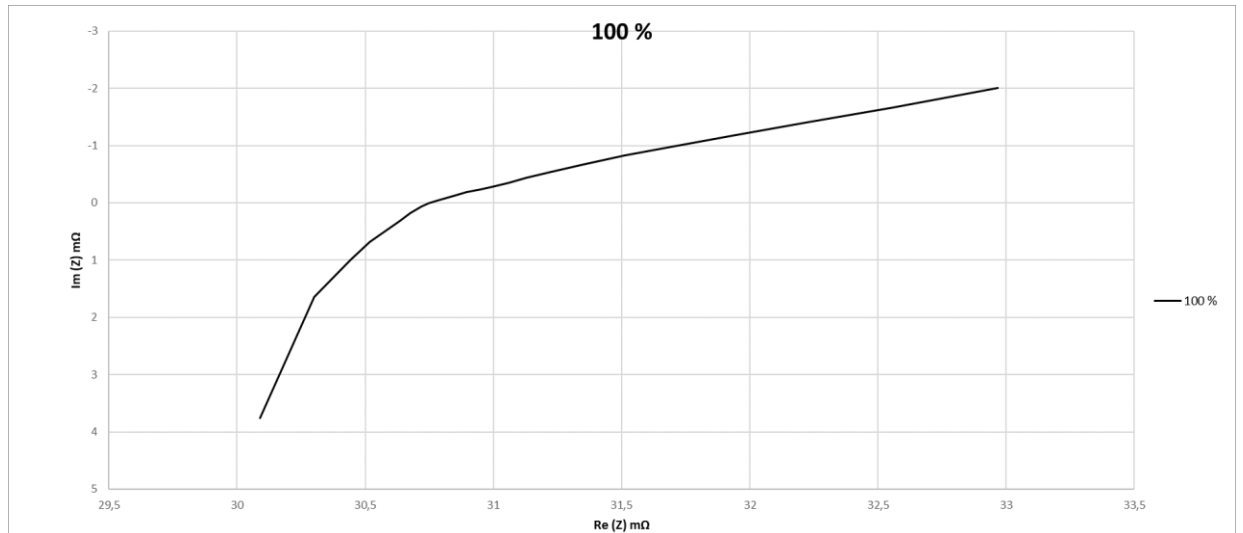


Kuva 5. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 20 %

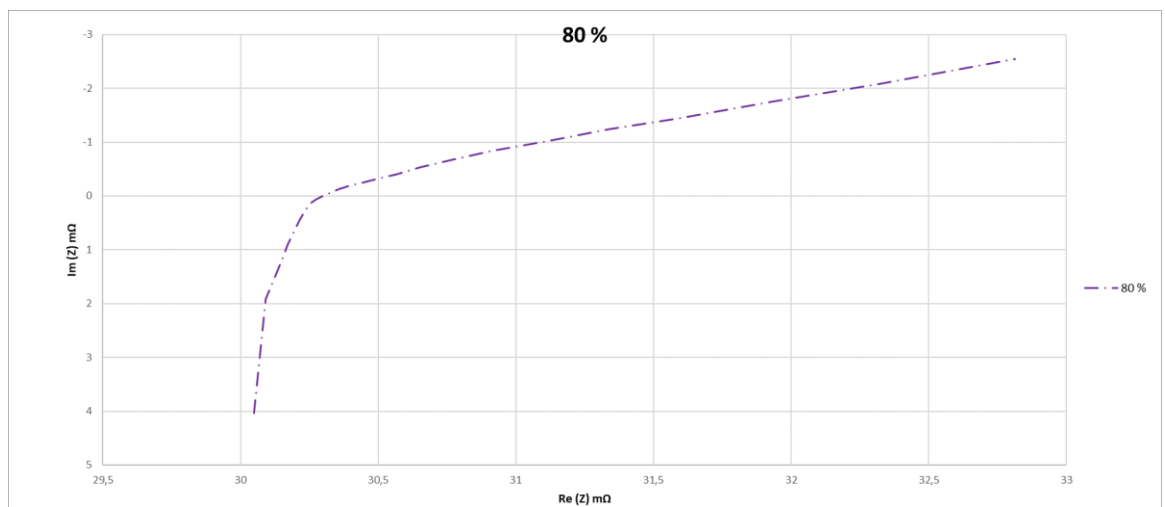


Kuva 6. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 0 %

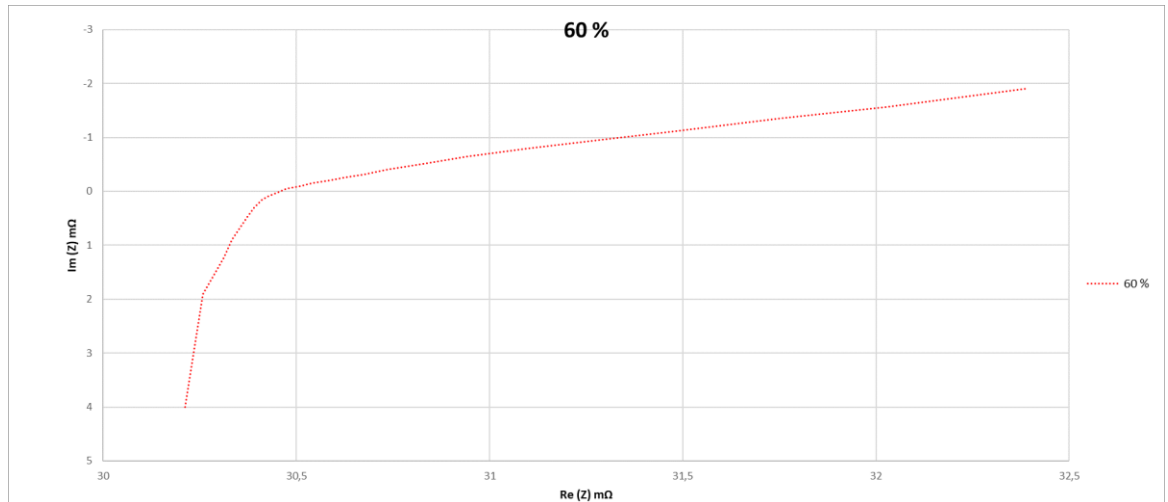
LMO-kenno: purku 60°C:ssa



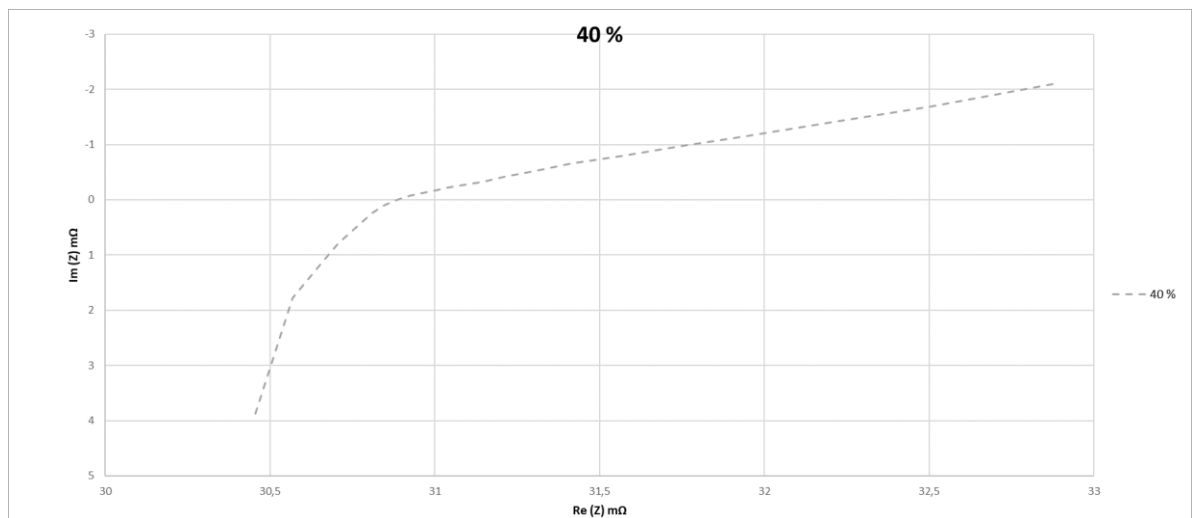
Kuva 1. LMO -kennon impedanssi varaustilan ollessa 100 %



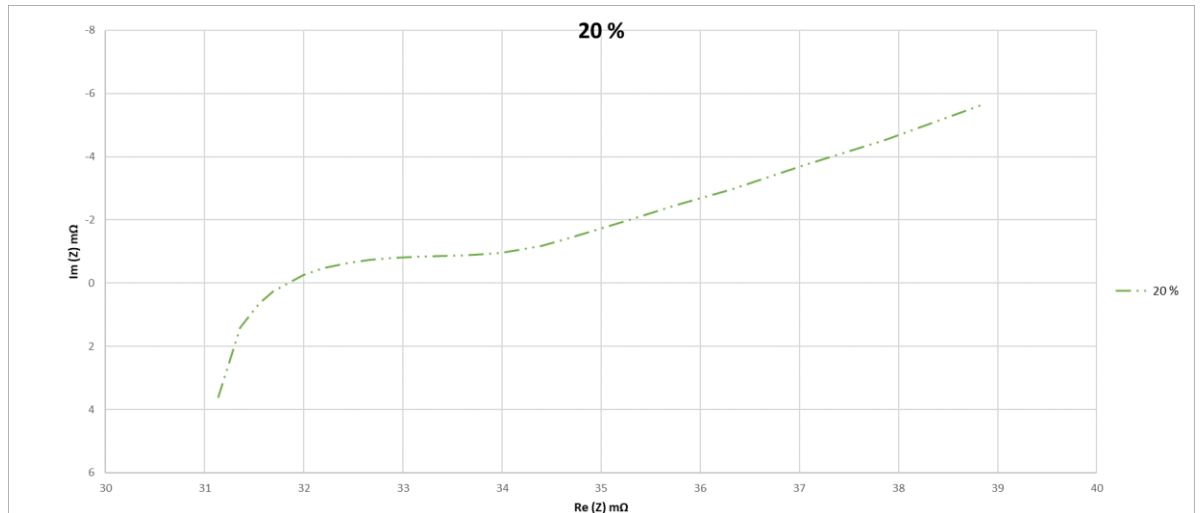
Kuva 2. LMO -kennon impedanssi varaustilan ollessa 80 %



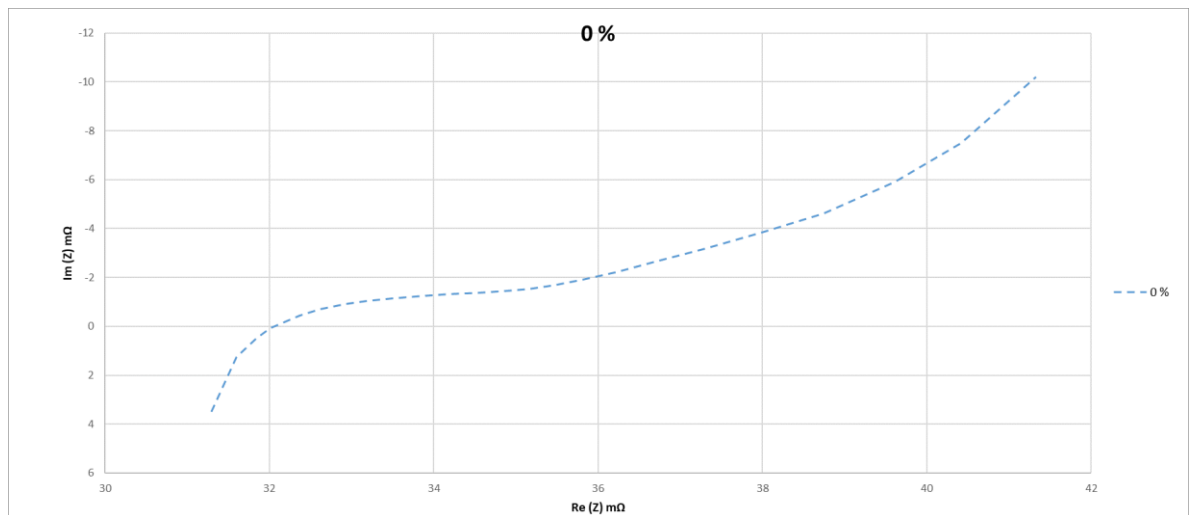
Kuva 3. LMO -kennon impedanssi varaustilan ollessa 60 %



Kuva 4. LMO -kennon impedanssi varaustilan ollessa 40 %

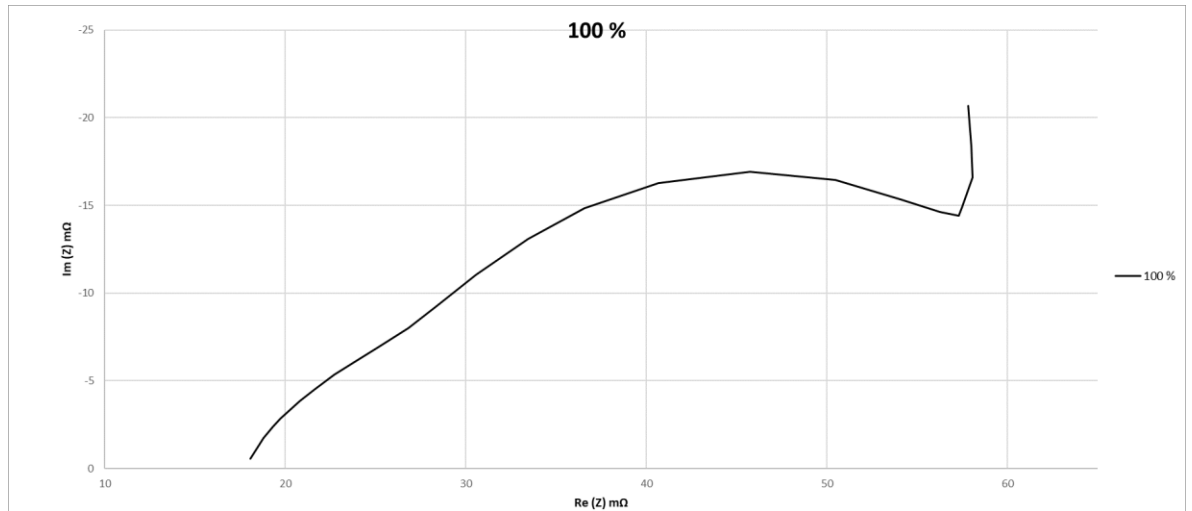


Kuva 5. LMO -kennon impedanssi varaustilan ollessa 20 %

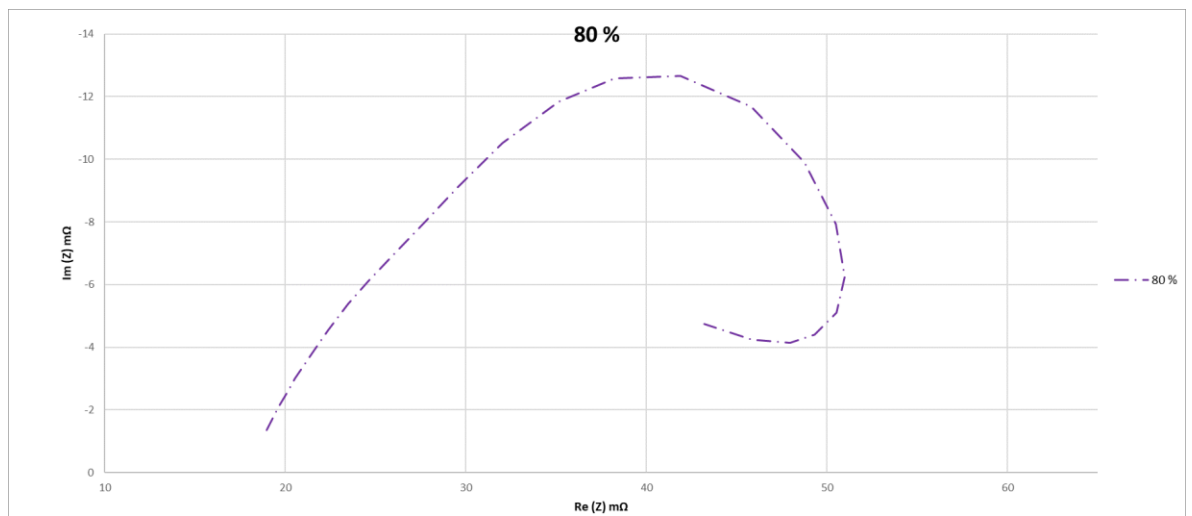


Kuva 6. LMO -kennon impedanssi varaustilan ollessa 0 %

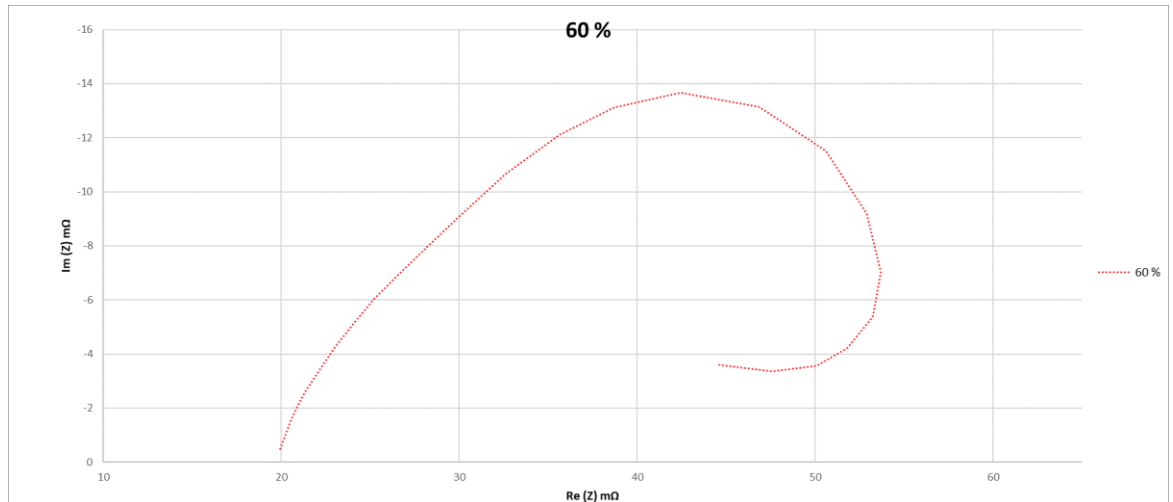
LTO-kenno: purku -20°C:ssa



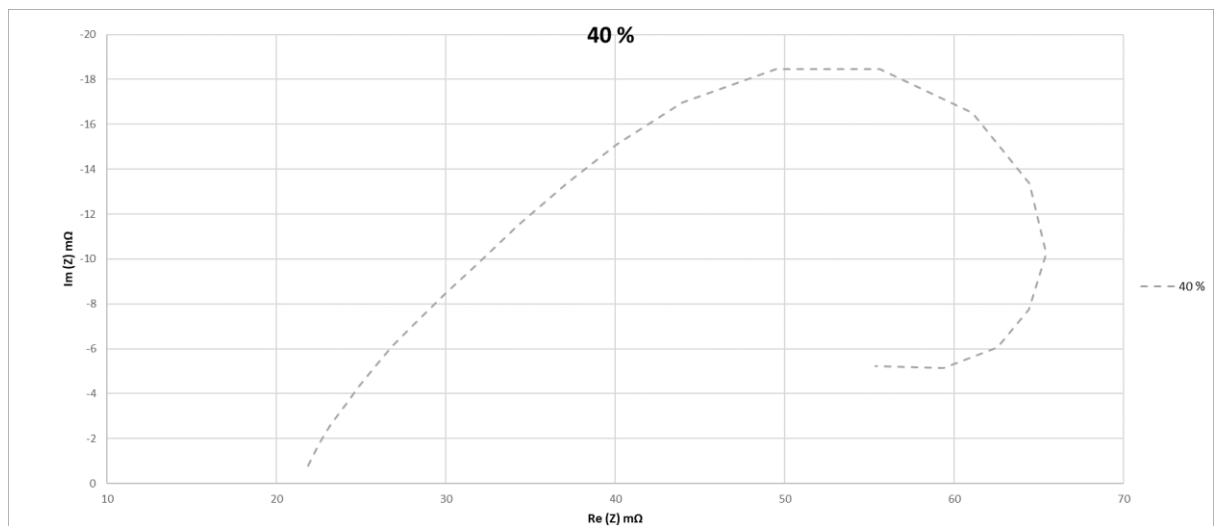
Kuva 1. LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 100 %



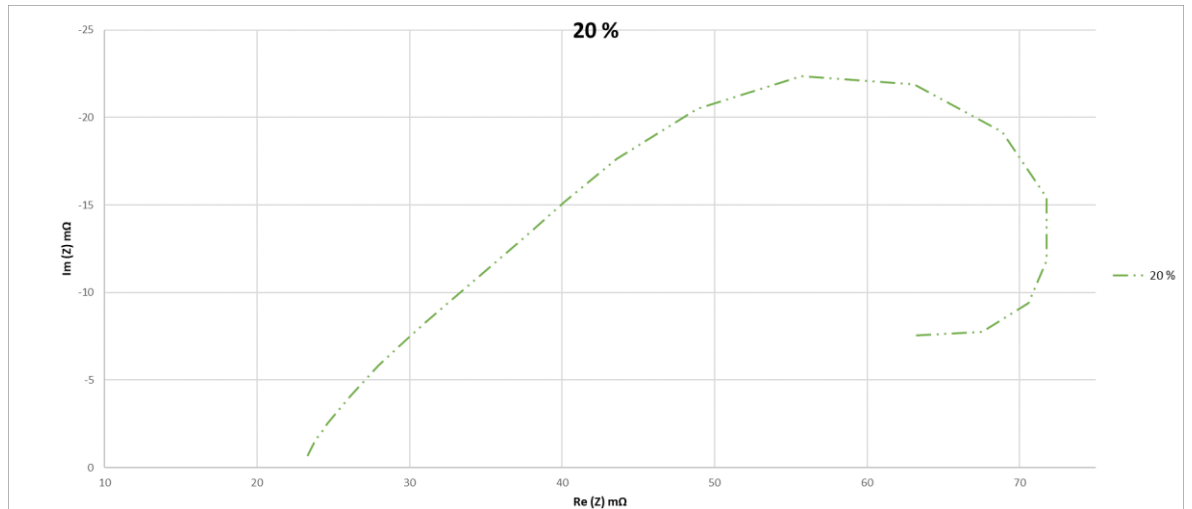
Kuva 2. LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 80 %



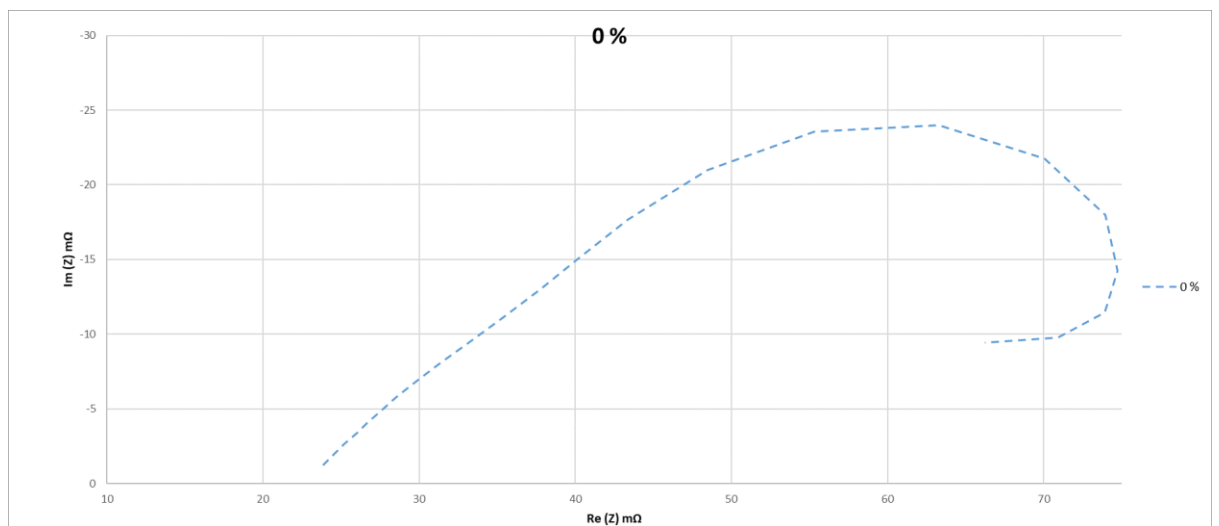
Kuva 3. LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 60 %



Kuva 4. LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 40 %

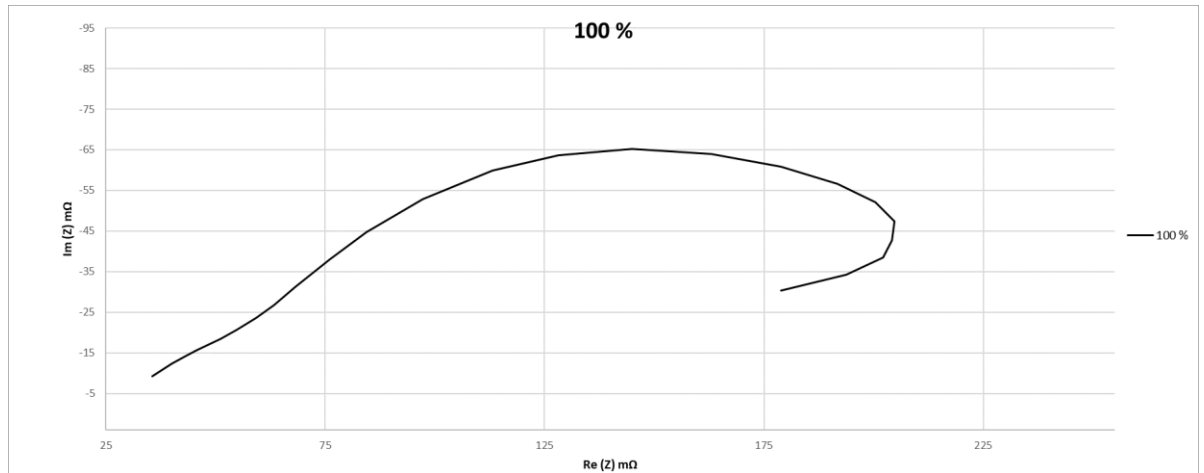


Kuva 5. LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 20 %

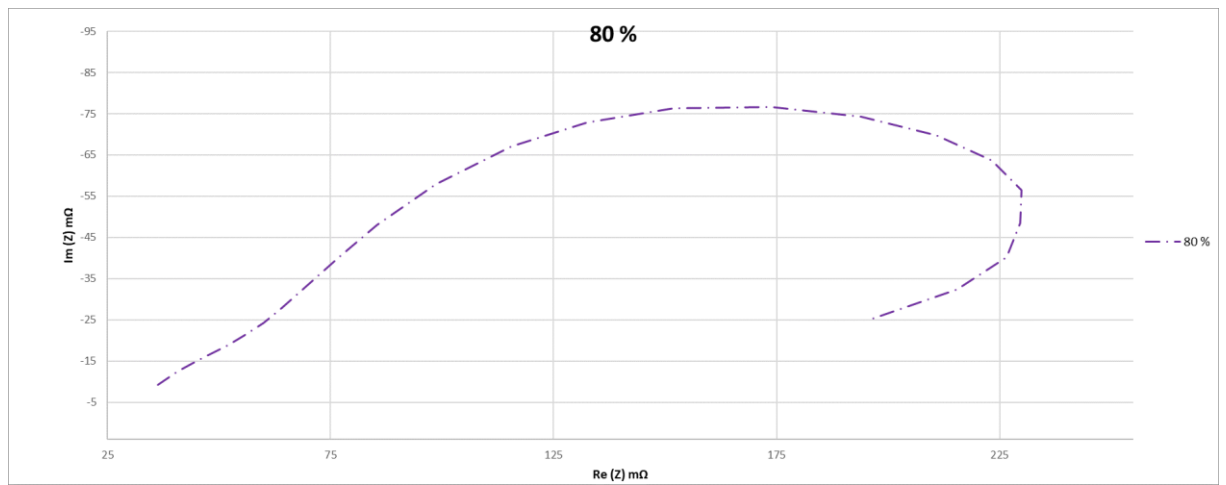


Kuva 6. LTO-kennon impedanssi varaustilan ollessa 0 %

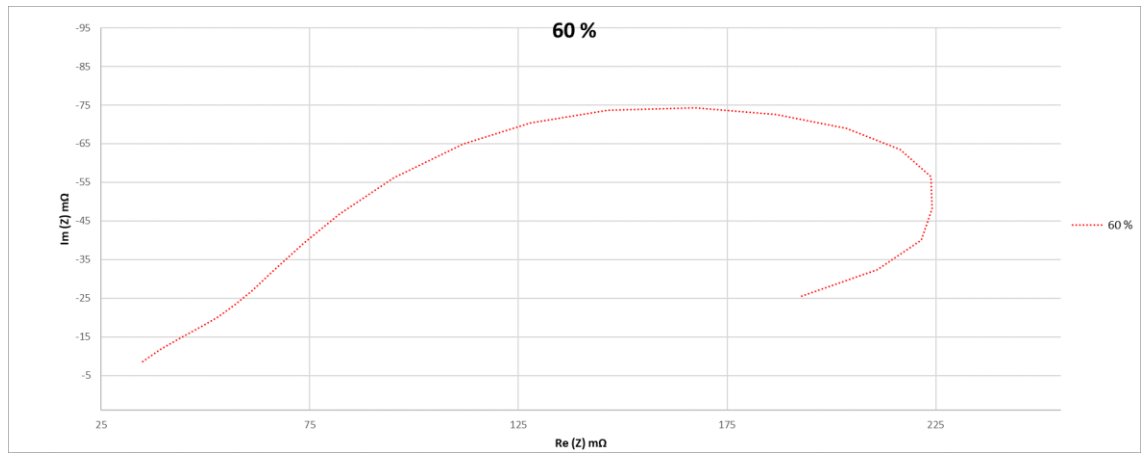
LFP-kenno: purku -20°C :ssa



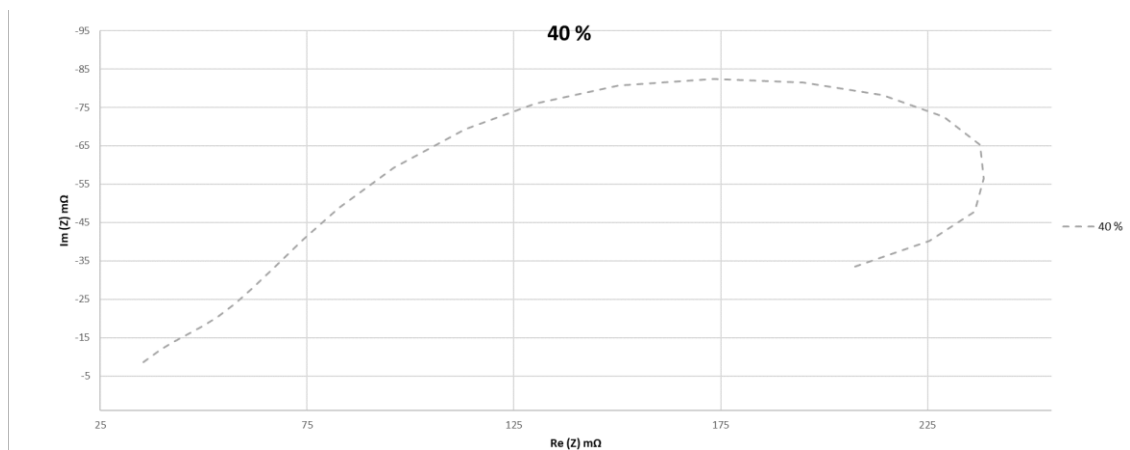
Kuva 1. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 100 %



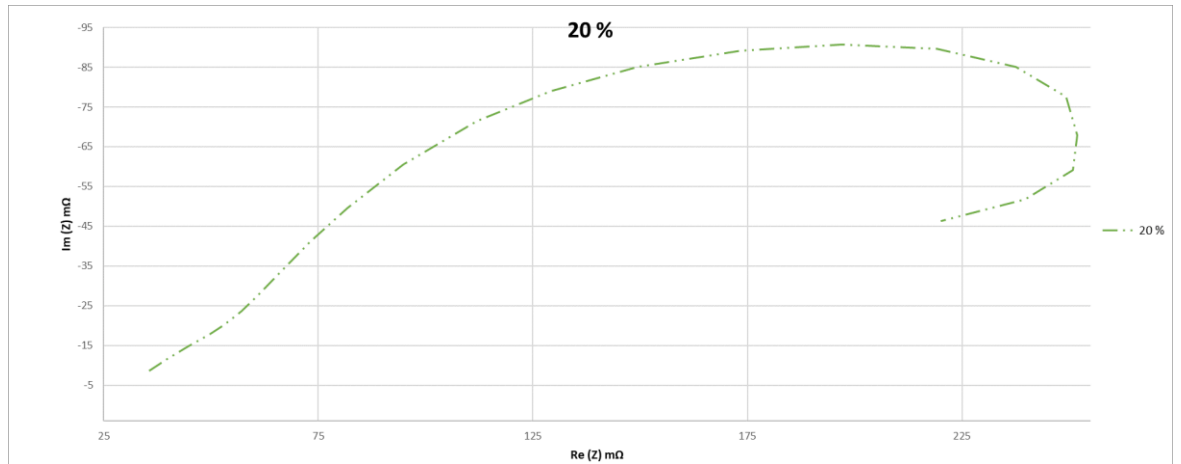
Kuva 2. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 80 %



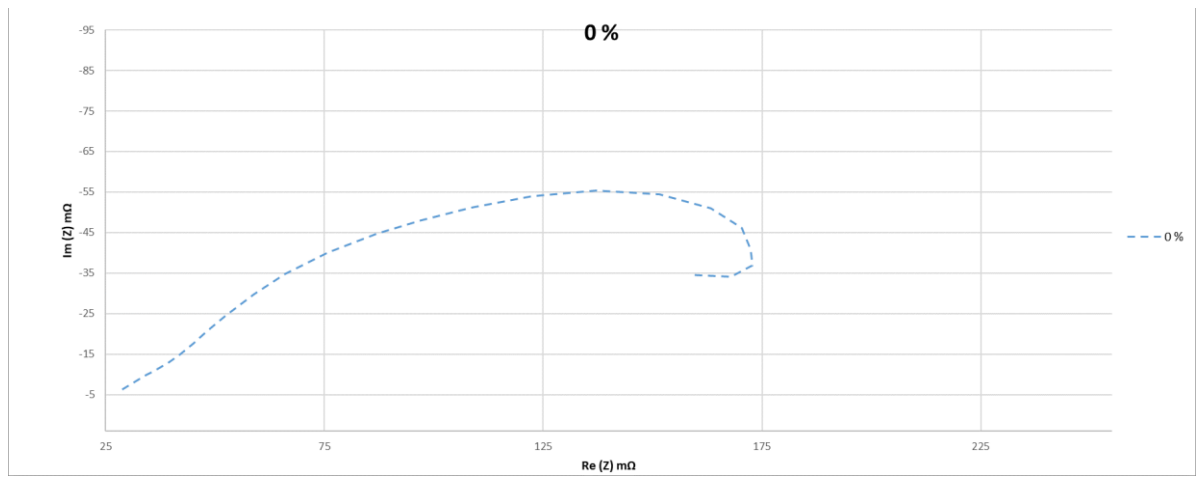
Kuva 3. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 60 %



Kuva 4. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 40 %

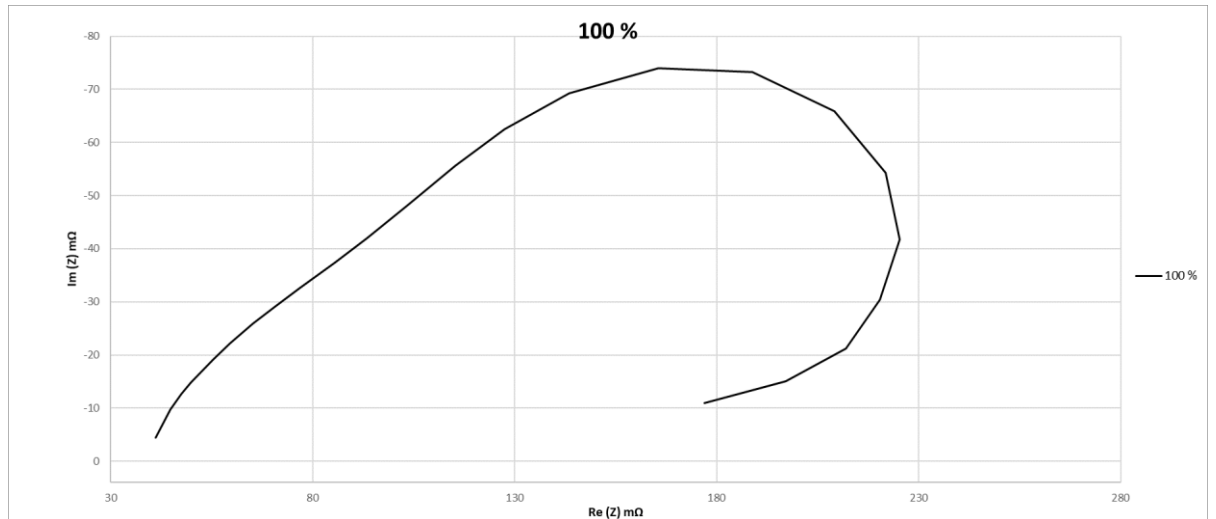


Kuva 5. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 20 %

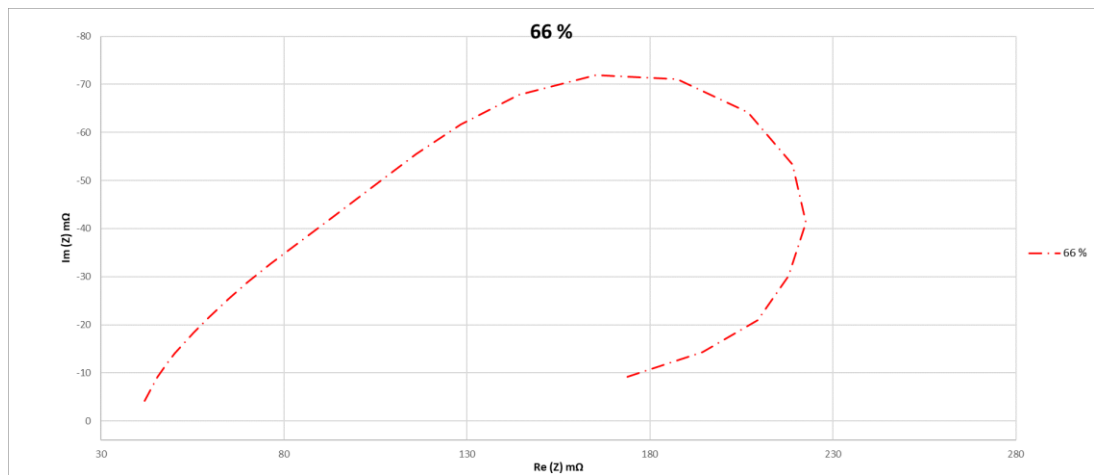


Kuva 6. LFP-kennon impedanssi varaustilan ollessa 0 %

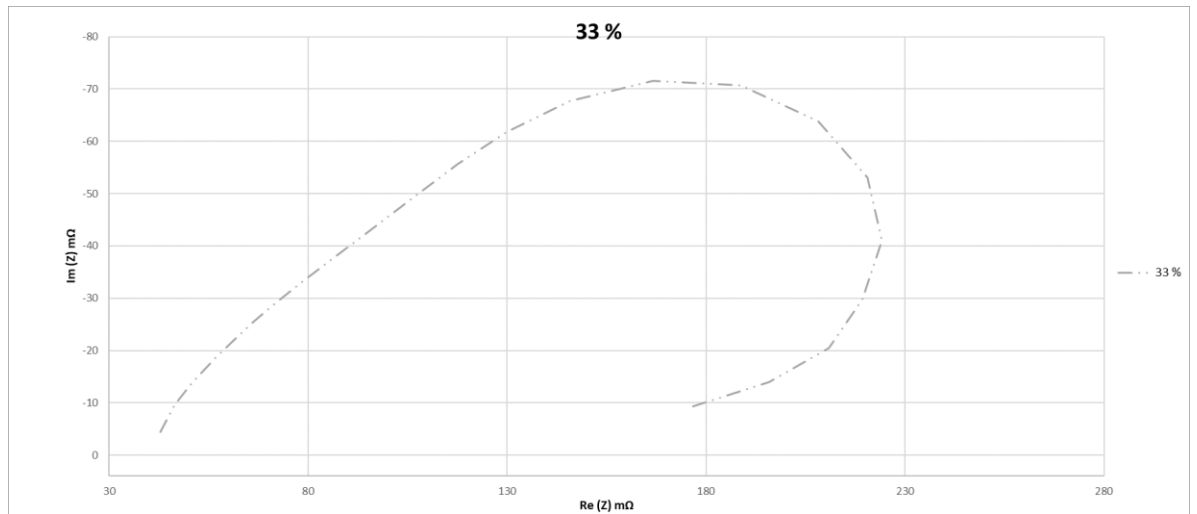
LMO-kemno: purku -20°C :ssa



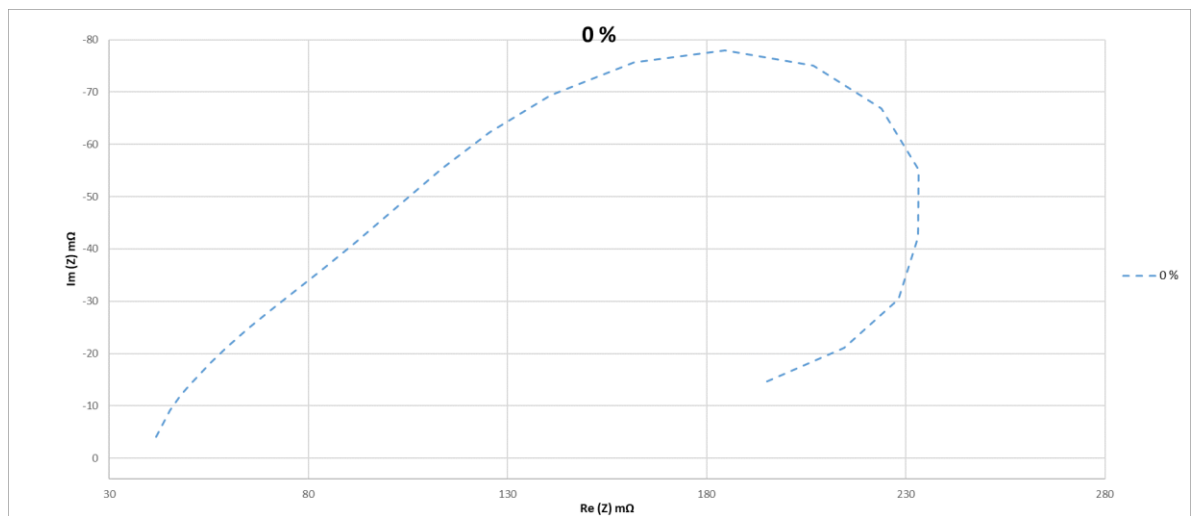
Kuva 1. LMO -kennon impedanssi varaustilan ollessa 100 %



Kuva 2. LMO -kennon impedanssi varaustilan ollessa n. 66 % (SOC 80 %)



Kuva 3. LMO -kennon impedanssi varaustilan ollessa n. 33 % (SOC 60 %)



Kuva 4. LMO -kennon impedanssi varaustilan ollessa 0 % (SOC 40 %)