

Aki Kuivajärvi

**HYDRAULISEN  
MAGNEETTIGENERAATTORIN KÄYTÖN  
OPTIMOINTI JA TOIMINNAN TURVAAMINEN**  
Akkutekniikan selvitys

Diplomityö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Professori Asko Ellman  
Tarkastaja: Tutkimuspäällikkö Jussi Aaltonen  
Joulukuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Aki Kuivajärvi: Hydraulisen magneettigeneraattorin käytön optimointi ja toiminnan turvaaminen  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikan DI-ohjelma  
Joulukuu 2024

---

Sähköistyminen on tällä hetkellä yksi keskeisimmistä trendeistä teollisuuden eri aloilla. Sen taustalla on pyrkimys ympäristövaikutusten vähentämiseen sekä energiatehokkuuden parantamiseen. Hybridiratkaisut, joissa akusto täydentää järjestelmän toimintaa, toimivat usein ponnahduslautana täysin sähköisille ratkaisuille. Hybridiratkaisut tukevat energiankulutuksen optimointia ja auttavat vastaamaan kiristyviin ympäristövaatimuksiin.

Tämä diplomityö on tehty Dynaset Oy:lle. Työ keskittyy akkutekniikan eri osa-alueisiin. Akkujen toimintaa, ominaisuuksia, eri akkutyyppejä sekä niiden soveltuvuutta erilaisiin käyttökohteisiin on käsitelty. Työssä tarkastellaan myös akuston valvonnan ja hallinnan teknologioita, joiden tarkoitus on varmistaa akkujen turvallinen ja tehokas käyttö. Pääpaino on tutkia eri akkutyypien soveltuvuutta hybridijärjestelmään hydraulisen magneettigeneraattorin rinnalle. Samalla selvitetään kustannustehokasta akustoratkaisua turvatoimintokäyttöön, jolla varmistetaan magneettigeneraattorilta tehonsa saavan magneettinostimen toiminta.

Akkutekniikan selvityksen perusteella turvatoimintojärjestelmään valittiin AGM-akut alhaisten kustannusten sekä luotettavuuden vuoksi. Hybridikäytössä päädyttiin litiumioniakkuihin niiden syklikeston sekä suuren energiatihedyyden ja lataus-purkaustehokkuuden ansiosta. Tämä yhdistelmä mahdollistaa optimaalisen suorituskyvyn sekä tehokkaan energian käytön hydraulisen järjestelmän rinnalla.

Avainsanat: akku, akkutekniikka, akkujärjestelmän suunnittelu, hybridikäyttöinen hydraulinen magneettigeneraattori

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Aki Kuivajärvi: Optimizing and securing the use of hydraulic magnet generator  
Master's thesis  
Tampere University  
Master's Degree Programme in Mechanical Engineering  
December 2024

---

Electrification is currently one of the most important trends in various industries. Its background is the effort to reduce environmental impacts and improve energy efficiency. Hybrid solutions, where the battery complements the operation of the system, often serve as an interim solution for fully electric solutions. Hybrid solutions support the optimization of energy consumption and help meet stricter environmental requirements.

This thesis has been conducted for Dynaset Oy. The study focuses on different areas of battery technology. The functions, properties, different types of batteries and their suitability for different applications have been discussed. The work also examines battery monitoring and management technologies, the purpose of which is to ensure the safe and efficient use of batteries. The focus is to investigate the suitability of different battery types for a hybrid system alongside a hydraulic magnet generator. At the same time, a cost-effective battery solution for safety function use is being investigated, which ensures the operation of the magnetic lifter, which receives its power from the magnetic generator.

Based on the analysis of battery technology, AGM batteries were chosen for the safety function system due to their low costs and reliability. In hybrid use, lithium-ion batteries were chosen due to their cycle life, high energy density, and charge-discharge efficiency. This combination enables optimal performance and efficient energy use alongside the hydraulic system.

Keywords: battery, battery technology, battery system design, hybrid powered hydraulic magnetic generator

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei  
 Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: [Listaa tähän kaikki tekoälysovellukset ja niiden versiot, joita olet käyttänyt tutkielmaprosessin aikana.]

Käyttötarkoitus: [Kuvaa tähän yksityiskohtaisesti, mihin tarkoitukseen ja miten tekoälyä on sovellettu opinnäytteeseen tutkielmaprosessin aikana.]

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: [Luettele tähän kaikki opinnäytteen vaiheet ja osiot, joissa tekoälyä on tutkielmaprosessin aikana käytetty.]

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Dynaset Oy:lle osana diplomi-insinöörin tutkintoani Tampereen yliopistossa. Työ keskittyy akkutekniikkaan sekä sen soveltamiseen osana hydraulijärjestelmää. Tarkoituksena on tarjota Dynaset Oy:lle uutta tietoa ja ratkaisuja akkutekniikkaan liittyen. Toivottavasti tämä tutkimusaihe edesauttaa matkaa kohti sähköistä siirtymistä.

Haluan erityisesti kiittää Pasi Yli-Kätkää todella mielenkiintoisesta aiheesta sekä Toni Hämäläistä saamastani avusta koko projektin ajan. Kiitokset myös muille Dynasetin työntekijöille mahtavasta työilmapiiristä. Haluan kiittää myös työn tarkastajana toimivaa Asko Ellmania työn alkuun saattamisesta sekä tarvittaessa saamastani tuesta työn edetessä. Kiitän lisäksi Jussi Aaltosta. Hän antoi Askon ohella asiantuntevia kommentteja työstäni.

Lopuksi haluan osoittaa lämpimät kiitokseni läheisilleni. He kannustivat minut lisäopintojen pariin ja tukivat minua opiskelujeni ajan.

Akaassa, 05.12.2024

Aki Kuivajärvi

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Tutkimuksen lähtökohdat .....	1
1.2 Ongelman asettelu .....	1
1.3 Työn tavoitteet .....	2
1.4 Työn rajaus .....	2
1.5 Työn rakenne .....	3
1.6 Tutkimusstrategia- ja kysymykset .....	3
2. HYDRAULISEN MAGNEETTIGENERAATTORIN ESITTELY .....	5
2.1 Rakenne ja toimintaperiaate .....	5
2.2 Käyttökohteet ja käyttäminen .....	6
3. AKUN TOIMINTA JA KOMPONENTIT .....	7
3.1 Toimintaperiaate .....	7
3.2 Elektrodit .....	10
3.3 Virrankerääjät .....	12
3.4 Elektrolyytti .....	13
3.5 Separaattori .....	14
3.6 Kennon kokoonpano .....	14
3.6.1 Sylinterimäiset kennot .....	15
3.6.2 Prismaattiset kennot .....	16
3.6.3 Pussikennot .....	17
4. AKUN TEKNISET TIEDOT JA NIIHIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT .....	18
4.1 Akun suorituskykyyn vaikuttavat rakenteelliset tekijät .....	18
4.2 Jännite .....	20
4.3 Virta ja teho .....	22
4.3.1 Varaus- ja purkausnopeus, C-arvo .....	23
4.3.2 Ominais-teho ja tehoteho .....	23
4.4 Energiasisältö .....	24
4.4.1 Kapasiteetti ja energiakapasiteetti .....	24
4.4.2 Akun varaustila, SoC (engl. State of Charge) .....	25
4.4.3 Purkaussyvyys, DoD (engl. Depth of Discharge) .....	25
4.4.4 Ominaisenergia ja energiateho .....	26
4.5 Akun elinkaari .....	26
4.5.1 Syklikesto .....	26
4.5.2 Itsepurkautuvuus (engl. self-discharge) .....	27
4.5.3 Akun kuntotaso, SoH (engl. State of Health) .....	28

4.5.4 Akun käytön vaikutukset sen kuntoon .....	28
5.AKUN LATAUSTEKNIIKAT .....	29
5.1 Vakiovirtalataus .....	29
5.2 Vakiojännitelataus .....	30
5.3 Vakiovirta- ja vakiojännitelataus.....	31
5.4 Vakioteholataus .....	31
5.5 Ylläpitolataus .....	32
5.6 Pulssilataus .....	32
6.AKKUTYYPIT .....	34
6.1 Lyijyakut .....	34
6.2 Nikkelipohjaiset akut.....	36
6.2.1 Nikkelikadmiumakut (NiCd).....	37
6.2.2 Nikkelimetallihydridiakut (NiMH).....	37
6.3 Litiumioniakut.....	38
6.3.1 Litiumrautafosfaatti (LFP).....	40
6.3.2 Litiumkobolttioksidi (LCO) .....	41
6.3.3 Litiumnikkelioksidi (LNO).....	41
6.3.4 Nikkelimangaanikoboltti (NMC).....	41
6.3.5 Nikkelikobolttialumiini (NCA) .....	41
6.3.6 Litiummangaanioksidi (LMO) .....	42
6.3.7 Litiumtitanaatti (LTO) .....	42
6.3.8 Litiumpolymeeri (LiPo) .....	42
6.4 Uudet akkutyypit.....	43
7.AKUSTON VALVONTA JA HALLINTA.....	44
7.1 Jännitteen seuranta .....	44
7.2 Virran seuranta.....	45
7.3 Lämpötilan seuranta .....	45
7.4 Kennojen tasapainotus .....	45
7.5 Lämmönhallinta .....	46
7.6 Varaustilan ja kuntotason arviointi .....	47
7.7 BMS, toiminta ja rakenne.....	48
7.8 Akkujärjestelmän kokoonpano .....	50
8.AKKUIHIN LIITTYVÄ LAINSÄÄDÄNTÖ .....	53
9.AKUSTOILLE ASETETTAVAT VAATIMUKSET .....	54
9.1 Hybridikäyttö.....	54
9.2 Turvatoimintokäyttö .....	57
9.3 Taloudelliset vaatimukset akustoille.....	59

10.AKUSTORATKAISUIDEN ANALYSOINNIT JA TESTAUS .....	60
10.1    Akkutyypit .....	60
10.2    Akustoratkaisut .....	62
10.3    Akuston testaus generaattorin rinnalla .....	63
11.TULOKSET .....	65
11.1    Hybridikäyttö .....	65
11.2    Turvatoimintokäyttö .....	66
12.POHDINTA.....	68
12.1    Tulosten arviointi.....	68
12.2    Käytetyn aineiston ja tulosten luotettavuus .....	69
12.3    Tulosten arvo kohdeyritykselle.....	70
12.4    Jatkokehitysehdotukset.....	70
LÄHTEET .....	72

LIITE A: LITIUMIONIAKKUJEN VERTAILU

LIITE B: AKKUTYYPPIEN VERTAILU

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AGM	engl. Absorbent Glass Mat, lyijyakutyyppe
BMS	engl. Battery Management System, akunhallintajärjestelmä
BTMS	engl. Battery Thermal Management System, akun lämmönhallintajärjestelmä
C-arvo	varaus- ja purkausnopeus
CAN	engl. Controller Area Network, tiedonsiirtoprotokolla
CC	engl. Constant Current, vakiovirta
CC/CV	engl. Constant Current/Constant Voltage, vakiovirta/vakiojännite
CV	engl. Constant Voltage, vakiojännite
DOD	engl. Depth of Discharge, purkaussyvyys
ED	saks. Einschaltdauer, käyttöjakso
FLA	engl. Flooded Lead Acid, avoin lyijyaku
HMG PRO	Dynaset Oy:n hydraulinen magneettigeneraattori
ICCT	engl. The International Council on Clean Transportation, kansainvälinen puhtaan liikenteen neuvosto
IEC	engl. International Electrotechnical Commission, Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
IR-häviö	jännitehäviö
kW	kilowatti
LCO	Litiumkobolttioksidi, litiumioniakun katodimateriaali
LFP	Litiumrautafosfaatti, litiumioniakun katodimateriaali
LiPo	Litiumpolymeeri, litiumioniakun elektrolyytin materiaali
LMO	Litiummangaanioksidi, litiumioniakun katodimateriaali
LNO	Litiumnikkelioksidi, litiumioniakun katodimateriaali
LTO	Litiumtitanaattioksidi, litiumioniakun anodimateriaali
MAG	Dynaset Oy:n nostomagneetti
NCA	Nikkelikobolttialumiini, litiumioniakun katodimateriaali
NICD	Nikkelikadmium, akkukemia
NIMH	Nikkelimetallihydridi, akkukemia
NMC	Nikkelimangaanikoboltti, litiumioniakun katodimateriaali
OCV	engl. Open Circuit Voltage, avoimen piirin jännite
PCM	engl. Phase Change Material, faasimuutosmateriaali / engl. Protection Circuit Module, analoginen suojapiiri
PRG	engl. Product Responsibility Group, tuotevastuuryhmä
SI-järjestelmä	ransk. Système international d'unités, kansainvälinen mittayksiköjärjestelmä
SOC	engl. State of Charge, akun varaustaso
SOH	engl. State of Health, käytetyn akun prosentuaalinen kapasiteetti suhteessa uuteen akkuun
VDC	tasasähköjännite
VRLA	engl. Valve Regulated Lead Acid, venttiiliohjattu lyijyaku
<i>Ag</i>	hopea
<i>Al</i>	alumiini
<i>C</i>	akun nimelliskapasiteetti
<i>Cu</i>	kupari
$E^0$	normaalipotentiali
$e^-$	elektroni
<i>F</i>	fluori
$H^+$	vetyioni
$H_2$	vetykaasu
$H_2O$	vesi

$H_2SO_4$	rikkihappo
$i$	käyttövirta
$Li$	litium
$M$	kapasiteetin kerrannainen
$n$	lukumäärä
$Pb$	lyijy
$PbO_2$	lyijydioksidi
$PbSO_4$	lyijysulfaatti
$Q$	kapasiteetti
$R$	ulkoinen kuorma
$R_i$	kennon sisäinen resistanssi
$t$	aika
$Zn$	sinkki
$\Delta G^0$	Gibbs'n vapaan energian muutos
$(\eta_a)_a$	anodilla tapahtuva aktivointipolarisaatio
$(\eta_a)_c$	katodilla tapahtuva aktivointipolarisaatio
$(\eta_c)_a$	anodilla tapahtuva konsentraatiopolarisaatio
$(\eta_c)_c$	katodilla tapahtuva konsentraatiopolarisaatio

# 1. JOHDANTO

Akkuteknologia on viime vuosikymmeninä kehittynyt merkittävästi ja kehitystyö jatkuu edelleen voimakkaana. Akut ovat keskeisessä roolissa uusiutuvaan energiaan siirtymisessä, jota muun muassa poliittiset päätökset sekä sähköajoneuvojen kasvava kysyntä kiihdyttävät. Sähköisen liikenteen ja energiatehokkaiden sovellusten kasvu on asettanut suuria vaatimuksia akkuteknologioille, jotka tukevat ympäristöystävällisempää tulevaisuutta. Kehittyneimmät akkuteknologiat, kuten litiumioniakut, ovat nousseet keskeiseen asemaan tarjoten tarvittavaa suorituskykyä, energiatehokkuutta ja luotettavuutta. (Crownhart, 2023)

Yksi akkujen käyttökohteista ovat erilaiset hybridijärjestelmät, johon myös tämä työ pohjautuu. Tämän diplomityön toimeksiantaja on Dynaset Oy. Työssä tehdään akkutekniikan selvitys, jota hyödynnetään hybridikäyttöisen magneettigeneraattorin kehittämisessä. Selvityksen on tarkoitus kartoittaa olemassa olevien akkutyyppeiden soveltuvuutta hydraulisen generaattorin rinnalle. Tämän ohella tutkitaan akustoratkaisua turvatoimintokäyttöön. Akkuseelvityksen perusteella on tarkoitus valita kumpaankin käyttöön soveltuvat akustoratkaisut ja auttaa yritystä hyödyntämään akkutekniikkaa myös tulevaisuudessa.

## 1.1 Tutkimuksen lähtökohdat

Tutkimus toteutetaan Dynaset Oy:lle, jonka tavoitteena on tuoda markkinoille hybridikäyttöinen hydraulinen magneettigeneraattori. Tarkoitus on kehittää jo olemassa olevaa tuotetta siten, että magneettigeneraattorin tehonlähteenä toimii hydrauliiikan lisäksi akusto. Tutkimuksen taustalla on Dynaset Oy:n tavoite pysyä mukana sähköiseen suuntaan kehittyvässä konemaailmassa ja lisätä tuotevalikoimaansa sähköisiä tuotteita.

## 1.2 Ongelman asettelu

EU:n päästötavoitteet tuleville vuosille ovat lisänneet kiinnostusta sähköistymiseen, jolla tarkoitetaan yleisesti sähkön käytön lisäämistä. Sähköistymisen avulla tavoitellaan hiili-neutraalisuutta sekä energiatehokkuutta. (Motiva, 2023)

Tämän diplomityön on tarkoitus selvittää akustoratkaisu kehiteltävään hydrauliseen magneettigeneraattoriin. Tällä hetkellä kyseisen magneettigeneraattorin tehonlähteenä toimii

ainoastaan hydraulikka, mutta kyseisestä tuotteesta on tarkoitus suunnitella energiatehokkaampi hybridiratkaisun avulla. Hybridiratkaisussa magneettigeneraattorin toiminnassa hyödynnetään akustosta saatavaa sähköenergiaa.

Hybridiratkaisun lisäksi tämän työn taustalla on ongelma, joka esiintyy mahdollisessa hydraulijärjestelmän vikatilanteessa. Generaattorin vikaantuessa siltä tehonsa saava nostomagneetti menettää magneettisuutensa ja magneetissa kiinni olevat esineet putoavat. Hydraulijärjestelmän varavirtalähteenä toimivan akuston on tarkoitus estää mahdolliset vaaratilanteet ja turvata nostomagneetin toiminta kaikissa tilanteissa. Kohdeyritykselle on tullut kyselyitä turvatoimintomahdollisuudesta, sillä joidenkin maiden satamissa lainsäädäntö edellyttää, että työskennellessä tällaiset vikatilanteet ovat huomioitu.

Viitekehystenä tutkimuksessa on akkutekniikan viitekehys. Tarkoituksena on hyödyntää olemassa olevaa tietoa akkujen toiminnasta ja ominaisuuksista, ja käyttää tätä teoriaa tavoitteiden saavuttamiseksi. Työn tavoitteet ja rajaus kuvataan tarkemmin seuraavaksi.

### **1.3 Työn tavoitteet**

Tämän työn tärkein tavoite on selvittää akustoratkaisu kahteen eri tapaukseen:

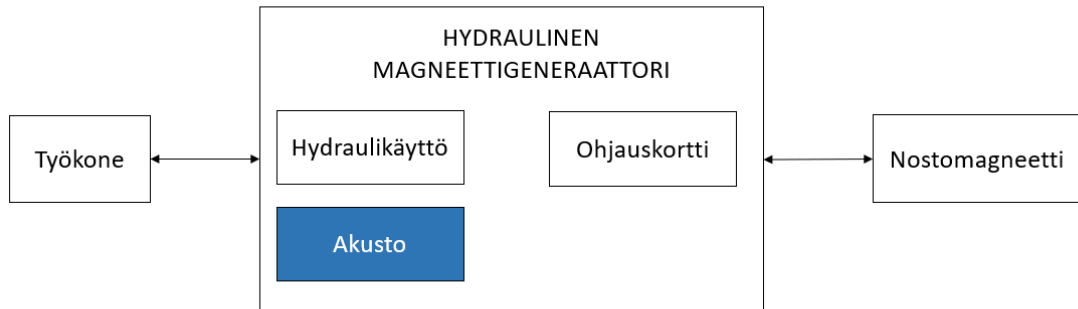
1. Optimointikäyttöön, jossa akusto kytketään tehonlähteeksi hydraulikan rinnalle.
2. Turvatoimintokäyttöön, jossa akuston on tarkoitus toimia ainoana tehonlähteenä magneettigeneraattorin vikaantuessa.

Kumpaankin tapaukseen on tarkoitus löytää akustoratkaisu kirjallisuuskatsauksen sekä magneettigeneraattorin ja nostomagneetin analysoinnin avulla. Kirjallisuuskatsauksessa perehdytään eri akkutekniikoita ja niiden ominaisuuksia koskeviin julkaisuihin. Analysoinnilla selvitetään kehiteltävän tuotteen toimintaa ja rakennetta, minkä tarkoituksena on saada selville akustolle asetettavia vaatimuksia. Näiden pohjalta vertaillaan eri akustoratkaisuja ja valitaan järjestelmään vaatimukset mahdollisimman hyvin täyttävä kustannustehokas akustoratkaisu. Työn pääpainona on akkutekniikan selvitys, mikä mahdollistaa akkujen hyödyntämisen myös yrityksen tulevissa kehityshankkeissa.

### **1.4 Työn rajaus**

Akkuteknologia käsittää monia eri akkutyyppejä. Tässä diplomityössä perehdytään akkutekniikan peruskäsitteisiin, erilaisten akkutyyppeiden ominaisuuksiin sekä akkujärjestelmiin. Tarkoituksena on selvittää ja vertailla eri akkutyyppeiden ominaisuuksia ja valita kustannustehokas akkujärjestelmä hydraulijärjestelmän rinnalle.

Valitun akkujärjestelmän tulee soveltua magneettigeneraattorin rinnakkaiseksi tehonlähteeksi ja sen tulee täyttää myös käyttölaitteena toimivan nostomagneetin asettamat vaatimukset. Kuva 1 esittää periaatekuvan hydraulisen magneettigeneraattorin järjestelmästä, jossa on korostettuna tämän diplomityön aihe.



**Kuva 1.** Aiheen rajaus.

## 1.5 Työn rakenne

Tämän diplomityön tutkimusstrategia on esitetty seuraavassa alaluvussa. Siinä määritellään tutkimuskysymykset ja esitellään menetelmät, joilla varsinaiseen lopputulokseen, akustojen valintoihin, on tarkoitus päästä. Tämän jälkeen esitellään hydraulinen magneettigeneraattori ja nostomagneetti. Luvusta kolme alkaa akkutekniikkaan liittyvä kirjallisuuskatsaus, jonka tarkoitus on hahmottaa akkuihin liittyvää tekniikkaa. Siinä akkuihin liittyvän kirjallisuuden ja tutkimusten avulla selvitetään akkujen toimintaperiaatetta, rakennetta sekä ominaisuuksia. Katsauksessa keskitytään markkinoilla oleviin akkutyyppeihin, joita käsitellään luvussa kuusi. Myös akuston valvontaa ja hallintaa sekä akkuihin liittyvää lainsäädäntöä käsitellään.

Luvussa yhdeksän määritetään akustoille asetettavat vaatimukset. Tämän jälkeen vertaillaan eri akkutyyppejä keskenään ja tehdään akustojen valinnat vaatimukset huomioon ottaen. Lopuksi pohditaan työn tuloksia ja työssä käytettäviä menetelmiä.

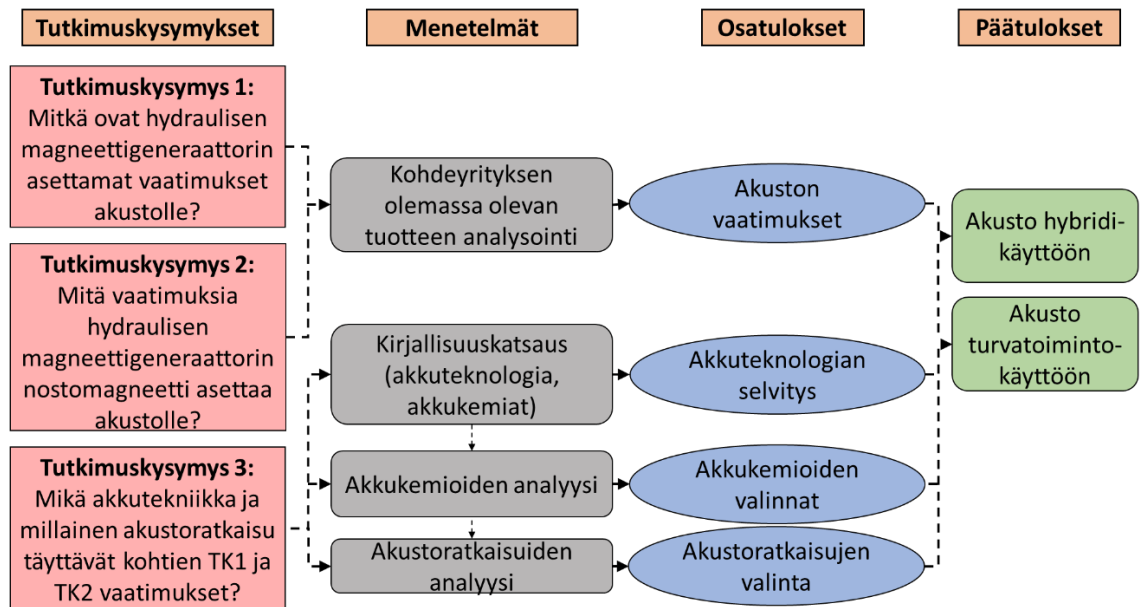
## 1.6 Tutkimusstrategia- ja kysymykset

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää akustoratkaisu hybridikäyttöiseksi kehiteltävään hydrauliseen magneettigeneraattoriin. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi on määritetty seuraavat 3 tutkimuskysymystä:

1. Mitkä ovat hydraulisen magneettigeneraattorin asettamat vaatimukset akustolle?

2. Mitä vaatimuksia hydraulisen magneettigeneraattorin nostomagneetti asettaa akustolle?
3. Mikä akkutekniikka ja millainen akustoratkaisu täyttävät kohtien 1 ja 2 vaatimukset?

Tutkimuskysymyksiin 1 ja 2 pyritään löytämään vastaukset magneettigeneraattorin ja nostomagneetin analysoinnilla. Tutkimuskysymykseen 3 vastaamiseksi tehdään kirjallisuuskatsaus, tutkimalla olemassa olevien akkutekniikoiden ominaisuuksia. Akkutekniikoita vertaamalla on tarkoitus löytää vaatimukset mahdollisimman hyvin täyttävä akustoratkaisu sekä hybridi- että turvatoimintakäyttöön. Kuva 2 havainnollistaa tähän työhön valittua tutkimusstrategiaa ja selventää työn etenemistä.



**Kuva 2.** Työn tutkimusstrategia.

## 2. HYDRAULISEN MAGNEETTIGENERAATTORIN ESITTELY

Hydraulinen magneettigeneraattori on Dynaset Oy:n tuote, joka saa tehonsa työkoneen hydraulijärjestelmästä, ja jonka tarkoituksena on mahdollistaa magneettinostimen toiminta. Tässä luvussa käsitellään hydraulisen magneettigeneraattorin ja magneettinostimen toimintaa. Tarkoituksena on havainnollistaa tuotetta, johon akustoratkaisut kehitetään, sekä kuvailla tyypillisiä käyttökohteita.

### 2.1 Rakenne ja toimintaperiaate

HMG PRO -mallit ovat Dynaset Oy:n valmistamia hydraulisia magneettigeneraattoreita. Niimensä mukaisesti ne toimivat hydrauliiikan avulla. HMG PRO -generaattori on esitetty kuvassa 3. Se koostuu hydraulimoottorista, generaattorirungosta sekä ohjauskeskuksesta. Hydraulimoottorin avulla pyöritetään generaattoria, joka tuottaa vaihtojännitteen generaattorin kyljessä olevalle ohjauskeskukselle. Ohjauskeskuksella jännite tasasuunnataan ja se syötetään 3-vaihepistorasian kautta magneettinostimelle. Tasavirran synnyttämä staattinen magneettikenttä mahdollistaa magneettinostimen toiminnan. (Hämäläinen, 2024)



**Kuva 3.** Hydraulinen magneettigeneraattori HMG Pro DSMART 10 kW (Dynaset Oy, 2024).

Dynaset HMG PRO -laitteita on seitsemää vakiomallia, jotka eroavat toisistaan generaattorin enimmäistehon mukaan. Teholuokat ovat välillä 3–40 kW. Kaikkien generaattoreiden magneeteille tuottama jännite on 220 VDC. HMG PRO -generaattoreita käytetään yhdessä

nostomagneettien kanssa. Dynaset MAG -nostomagneetti on kuvattuna kuvassa 4. Niitä on erikokoisia, nostokapasiteetiltaan välillä 5,5–70 tonnia. Magneettikäänin teho on pienimmällä magneetilla 3 kW ja suurimmalla 20 kW.



*Kuva 4. Dynaset MAG -nostomagneetti (Dynaset Oy, 2024).*

## 2.2 Käyttökohteet ja käyttäminen

Hydraulista magneettigeneraattoria ja nostomagneettia käytetään pääosin rautamateriaalien käsittelyssä, kierrätyksessä sekä keräilyssä. Esimerkiksi rautateiden puhdistus sekä satamissa tapahtuva kuorman lastaus ovat tyypillisiä käyttökohteita. Nostomagneettien käytösuhde (ED, saks. Einschaltdauer) on 60 %. Käytösuhteella kuvataan laitteen suurinta sallittua käyttöaikaa suhteessa tarvittavaan lepoaikaan. (Hämäläinen, 2024)

## 3. AKUN TOIMINTA JA KOMPONENTIT

Akku on laite, joka varastoi energiaa kemiallisessa muodossa. Tämä energia on purettavissa suoraan sähköenergiaksi sähkökemiallisten hapetus-pelkistysreaktioiden avulla. Latausvaiheessa sähkövirran avulla saadaan reaktiot tapahtumaan vastakkaiseen suuntaan. (Linden & Reddy, 2011, s. 26)

Akun pienin toiminnallinen yksikkö on kenno. Akku koostuu yhdestä tai useammasta kennoista. Näiden kennojen koostumus määrää muun muassa niiden jännitteen, niihin varastoitavan sähkövarauksen määrän sekä kuinka suuri sähkövirta niistä voidaan ottaa. Nämä kennot yhdistetään usein yhdeksi akuksi kotelon sisälle kytkemällä ne sarjaan tai rinnan, tai näitä kytkentöjä yhdistelemällä. Kytkentään vaikuttaa akulta haluttu jännite sekä kapasiteetti. Kotelon ulkopuolella ovat ulkoiset liittimet, joihin sitä käyttävä laite kytketään. (Linden & Reddy, 2011, s. 26)

### 3.1 Toimintaperiaate

Kennon toiminnan keskeinen käsite voidaan tiivistää seuraaviin seikkoihin (Castrejon Suarez del Real, 2024a):

1. Sähkövirran syntyminen kahden elektrodin välisen sähköisen potentiaalieron seurauksena.
2. Tämän sähköisen potentiaalieron eli jännitteen ylläpitäminen.
3. Kemialliset reaktiot sähkötasapainon ylläpitämiseksi. Näin ollen negatiivisen varauksen saapuessa elektrodille, on joko vastaavan positiivisen varauksen myös saavuttava sille tai negatiivisen varauksen on poistuttava siitä. Vastaavasti negatiivisen varauksen poistuessa elektrodilta, on siltä poistuttava myös vastaava positiivinen varaus tai sille on saavuttava negatiivinen varaus.

Castrejon Suarez del Realin (2024a) mukaan kennojen suunnittelutyössä suuri painopiste on viimeiseksi mainitulla seikalla. Tämän on tarkoitus toteutua mahdollisimman turvallisella, ennustettavalla ja toistettavalla tavalla.

Sähkökemialliset kennot voidaan jakaa kahteen pääryhmään, galvaanisiin kennoihin ja elektrolyysikennoihin. Galvaanisissa kennoissa spontaanit hapettumis-pelkistymisreaktiot aikaansaavat sähköisen jännitteen. Elektrolyysikennoissa tilanne on päinvastainen, eli elektrodien välille on kytketty ulkoinen jännitelähde, jonka syöttämien elektronien avulla

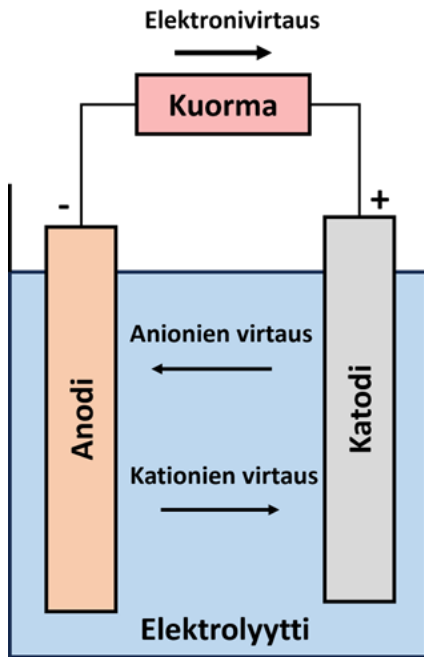
halutut hapettumis-pelkistymisreaktiot pakotetaan tapahtumaan. Näin ollen akkua purettaessa kennot toimivat galvaanisen kennon tavoin ja ladattaessa elektrolyysikennon tavoin. (Hänninen ym., 2018, s. 143)

Kenno koostuu kolmesta pääkomponentista:

1. Anodista, elektrodista, jolla tapahtuu hapetusreaktio eli elektronin luovuttaminen.
2. Katodista, elektrodista, jolla tapahtuu pelkistysreaktio eli elektronin vastaanottaminen.
3. Elektrolyytistä, joka mahdollistaa ionien liikkumisen elektrodien välillä.

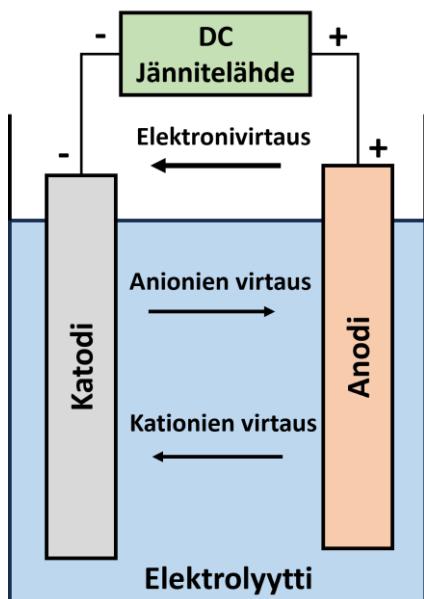
Elektrodeille saapuvat ja sieltä lähtevät elektronit, negatiiviset varaukset, kulkevat ulkoista virtapiiriä pitkin ja muodostavat akusta saatavan hyödyllisen sähkövirran. Elektrodit ovat upotettuina väliaineeseen, elektrolyyttiin. Elektrolyytti sisältää varauksenkantajina toimivia ioneja. Näiden lisäksi akun toiminnalle välttämättömiä ovat separaattori eli erotin ja itse kotelo. Separaattori on yleensä huokoista eristettä, jonka tehtävänä on estää oikosulku elektrodien välillä. Separaattorin on lisäksi tarkoitus päästää lävitseen ionit, jotka vapautuvat kemiallisten reaktioiden yhteydessä samaan aikaan elektronien kanssa ylläpitäen sähkökemiallista tasapainoa. (Linden & Reddy, 2011, s. 26–27)

Kuva 5 havainnollistaa kennon toimintaa purkauksen aikana. Kuvasta huomaamme elektronien liikkuvan anodilta, joka luovuttaessaan elektronin hapettuu, ulkoisen kuorman läpi katodille. Katodilla positiivinen ioni, kationi, ottaa elektronin vastaan ja pelkistyy katodin pinnalla. Negatiiviset ionit, anionit, virtaavat kohti negatiivista anodia. (Linden & Reddy, 2011, s. 29–30)



**Kuva 5.** Kennon sähkökemiallinen toiminta purettaessa akkua (mukailtu lähteestä Linden & Reddy, 2011, s. 30).

Latauksen aikana tapahtuvaa kennon toimintaa on esitetty alla olevassa kuvassa 6. Kuva selventää reaktioiden tapahtuvan toiseen suuntaan kuin akun purkauksen yhteydessä, ja myös anodi ja katodi ovat toisinpäin. (Linden & Reddy, 2011, s. 30–31)



**Kuva 6.** Ladattaessa akkua reaktiot tapahtuvat toiseen suuntaan (mukailtu lähteestä Linden & Reddy, 2011, s. 31).

## 3.2 Elektrodit

Yksinkertaisessa kennossa on kaksi elektrodia, jotka ovat eri materiaalia. Sähköinen potentiaaliero näiden kahden materiaalin välillä saa aikaan elektronien liikkeen ulkoista virtapiiriä pitkin kennon kuormitustilanteessa. (Zoski, 2007, s. 28)

Yksi yleinen nimeämiskäytäntö elektrodeille on anodi ja katodi. Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio IEC (engl. International Electrotechnical Commission) määrittelee anodin olevan elektrodi, jolla hapetusreaktio tapahtuu (IEC Electropedia, 2004). Huomiona mainitaan, että anodi on negatiivinen elektrodi akkua purettaessa ja positiivinen latauksen aikana. Dell & Rand (2001, s. 13) toteavat, että termien katodi ja anodi käyttäminen akkujen yhteydessä saattaa aiheuttaa sekaannusta tämän seikan takia, sillä ladattaessa anodista tulee katodi ja katodista anodi. Sekaannusten välttämiseksi, he suosittelevat käyttämään termejä negatiivinen ja positiivinen elektrodi, sillä ne pysyvät samoina akun lataamisen ja purkamisen aikana.

Elektrodit ovat usein jauhemaisia materiaaleja, jotka yhdistetään sidosaineiden ja muiden kemikaalien kanssa lietemäisiksi levitteiksi, jotka pinnoitetaan virrankerääjien pintaan. Kahden elektrodin koskettamisesta seuraa oikosulku. Siksi elektrodit pidetään fyysisesti erillään separaattorilla, joka on riittävän huokoinen päästääkseen ionit kulkemaan lävitensä. (Castrejon Suarez del Real, 2024a)

Kemialliset reaktiot, jotka tuottavat sähköä, tapahtuvat näiden kahden elektrodin pinnalla. Kumpikin elektrodi käy lävitse puolikennoreaktion: anodi hapetusreaktion ja katodi pelkistysreaktion. Elektrodi koostuu reaktioon osallistuvasta aktiivimateriaalista ja metallikomponentista, virrankerääjästä, johon tämä aktiivimateriaali on kiinnitetty. Kennosta johdetun ulkoisen virran liikkeellepaneva voima, kennon lähdejännite, on elektrodien potentiaaliero. Tämän lähdejännitteen suuruus riippuu paitsi elektrodeilla reagoivien aineiden kyvystä sitoa itseensä elektroneja myös kennon kuormituksesta, lämpötilasta, ja kennossa olevien aineiden pitoisuuksista. Koska potentiaali muuttuu siirryttäessä sähköä johtavasta faasista toiseen ja kennon potentiaali on näiden yksittäisten faasirajojen välisten potentiaalierojen summa, myös monet kennon rakenteelliset seikat vaikuttavat elektrodien väliltä mitattavaan jännitearvoon. Tällaisia seikkoja ovat mm. mahdolliset erottimet kennon anodi- ja katoditilan välillä, nesteliitokset sekä elektrolyytin ionikonsentraatiot. (Hänninen ym., 2018, s. 151)

Elektrodien välille syntyvä jännite on suurimmillaan kennon ollessa tasapainotilassa, eli silloin kun sen läpi ei kulje virtaa. Tätä maksimiarvoa sanotaan kennon lähdejännitteeksi. Se kuvaa tilaa, jossa koko kennoreaktiota vastaava energiamuutos muuttuu sähkötyöksi, toisin

sanoen kennon hyötysuhde on 100 %. Virran kulkiessa hyötysuhde on kuitenkin aina alle 100 %, eli napajännite on aina lähdejännitettä pienempi. Vaikka lähdejännitteen energiaa ei pystytä kokonaisuudessaan hyödyntämään, lähdejännite pystytään kokeellisesti mittaamaan. Se on kennon toimintakyvyn tärkeä mitta. (Hänninen ym., 2018, s. 151)

Eri elektrodimateriaaliparit tuottavat erilaisia jännitteitä, sillä aineiden taipumus luovuttaa ja vastaanottaa elektroneja on erilainen. Aineiden taipumusta reagoida hapettumis-pelkistymisreaktiossa kuvataan normaalipotentialeilla ( $E^0$ ). Normaalipotentialit vastaavat kennosta mitattua tasapainopotentialia, ja ne liittyvät aina tiettyyn hapettumis-pelkistymispariin. Taulukossa 1 on esitetty eri aineille pelkistymisreaktioiden osareaktiot sekä normaalipotentialiarvo  $E^0$ . Vertailukohtana on vedyn reaktio



jossa kahdesta vetyionista  $H^+$  ja kahdesta elektronista  $e^-$  syntyy vetykaasua  $H_2$ .

Reaktiolle on sovittu normaalipotentiali  $E^0 = 0,00 V$ . Kunkin aineen hapettumis-pelkistymisaipumus on mitattu verrattuna vedyn reaktioon standardiolosuhteissa (+25 °C). Hapettunut ja pelkistynyt muoto muodostavat niin sanotun hapettumis-pelkistymisparin. Esimerkiksi  $Li^+/Li$  on hapettumis-pelkistymispari, jonka  $E^0 = -3,04 V$ . Tällaista sarjaa, johon on  $E^0$ -arvojen perusteella listattu aineita kasvavan pelkistymispyrkimyksen mukaiseen järjestykseen, sanotaan sähkökemialliseksi jännitesarjaksi. (Hänninen ym., 2018, s. 144–146)

**Taulukko 1.** Normaalipotentialiarvoja (mukailtu lähteestä Haynes ym., 2010).

Reaktio	Normaalipotentiali, $E^0$ (V)
$Li^+ + e^- \rightleftharpoons Li$	-3,04
$Al^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons Al$	-1,66
$Zn^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Zn$	-0,76
$2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2$	0,00
$Cu^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Cu$	+0,34
$Ag^+ + e^- \rightleftharpoons Ag$	+0,80
$F_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2F^-$	+2,87

Sähkökemiallisesta jännitesarjasta selviävät hapettumis-pelkistymisparin elektrodireaktiot sekä anodin ja katodin muodostuminen. Suuremman  $E^0$ -arvon omaavaa puolikennoa

nimitetään katodiksi, sillä siinä tapahtuu pelkistyminen. Normaalipotentialiarvojen perusteella voidaan selvittää kennon lähdejännite. Se saadaan lasketuksi kaavalla

$$E^0(\textit{kenno}) = E^0(\textit{katodi}) - E^0(\textit{anodi}), \quad (2)$$

jossa  $E^0(\textit{katodi})$  on parin, jossa tapahtuu pelkistyminen,  $E^0$ -arvo ja  $E^0(\textit{anodi})$  on parin, jossa tapahtuu hapettuminen,  $E^0$ -arvo. (Hänninen ym., 2018, s. 151)

Teoriassa korkeajännitteinen kenno olisi mahdollista valmistaa yhdistämällä erittäin korkean ja matalan potentiaaliarvon omaavat materiaalit, esimerkiksi fluoridi ja litium. Kennon lähdejännitteeksi saataisiin 5,9 V. Käytännössä tämä ei kuitenkaan ole läheskään aina mahdollista esimerkiksi sopivan elektrolyytin puuttumisen seurauksena. Elektrolyytin olisi kestävä suuria jännitteitä hajoamatta, eikä se saisi reagoida haitallisella tavalla elektrodimateriaalien kanssa. Tämä on esimerkki monimutkaisuudesta ja kompromisseista, joihin akkujen suunnittelijat törmäävät kehitystyössään. (Castrejon Suarez del Real, 2024a)

### 3.3 Virrankerääjät

Virrankerääjien perustehtävä on liittää ja toimittaa elektroneja aktiivisista elektrodimateriaaleista ulkoiseen virtalähteeseen ja päinvastoin. Virrankerääjien tulisi kyetä varmistamaan sekä pienillä että suurilla sähkövirroilla aktiivisten materiaalien eheys sekä liitäntäpintojen kiinteä yhteys. Perinteisesti mikä tahansa metallinen virrankerääjä tai substraatti voi toimia anodina tai katodina edellyttäen, että ne välittävät elektronien virtauksen. (Lamiel ym., 2022)

Sen lisäksi, että virrankerääjät voivat kerätä varauksia, ne toimivat myös eräänlaisena kasvualustana aktiivisille materiaaleille. Kasvavat aktiiviset materiaalit virrankerääjissä ovat osoittaneet mielenkiintoisia ominaisuuksia elektrodeille. On havaittu (Lamiel ym., 2022)

- Parempi adheesio ja mekaaninen kestävyys
- Suurempi johtavuus
- Laajempi sähkökemiallisesti aktiivinen pinta-ala
- Suora synteesi ilman lisäaineita

Ensimmäisissä kennotyypeissä, kuten Daniellin kenno, elektrodimateriaali oli metallia ja uudemmissa, esimerkiksi litiumionikenoissa, materiaalina käytetään epämetallia. Epämetallit ovat usein hauraita ja suhteellisen huonoja sähkönjohtavuudeltaan. Elektrodina käytettäessä epämetallit yleensä jalostetaan jauhemaisiin hiukkasiin, jotta kemiallisiin reaktioihin käytettävissä oleva pinta-ala olisi mahdollisimman suuri. Jauhemaisiin hiukkasiin yh-

distetään lisäaineita ja jauhe saatetaan lietemäiseksi, joka liisteröidään metallisten virran-kerääjien pinnalle. Lisäaineilla parannetaan kennon ominaisuuksia, kuten johtavuutta, ja tasapainotetaan kemiallisia prosesseja kennon sisällä. (Castrejon Suarez del Real, 2024a)

Metallisten elektrodien tapauksissa, kennossa ei tyypillisesti ole käytetty erillisiä virran-kerääjiä. Itse elektrodimateriaalit ovat tällöin mekaanisesti riittävän kestäviä ja hyviä sähkö-johtimia. (Castrejon Suarez del Real, 2024a)

### 3.4 Elektrolyytti

Elektrolyytti on välttämätön väliaine, jossa on vapaasti liikkuvia sähköisesti varautuneita ioneja. Ionit voivat olla joko negatiivisesti varautuneita anioneja tai positiivisesti varautuneita kationeja. Elektrolyytin täytyy päästää ionit kulkemaan lävitsensä, mutta sen on oltava elektronien este, jotta vältetään oikosululta. Yksi elektrolyytin tärkeimmistä ominaisuuksista on ionijohtavuus, eli kuinka nopeasti ionit voivat liikkua sen läpi. Käytetty elektrolyytti vaikuttaa merkittävästi ionijohtavuuteen ja siihen, kuinka tehokkaasti ionit ovat vuorovai-kuksessa elektrodien kanssa. Tämä vaikuttaa muun muassa maksimivirtaan, joka akusta saadaan ilman merkittävää jännitteen alenemista. (Castrejon Suarez del Real, 2024a)

Elektrolyytti voi olla nestemäistä, kiinteää tai geelimäistä yhdistettä. Jokaisella vaihtoehdolla on omat etunsa ja haasteensa. Nestemäiset elektrolyytit olivat käytössä ensimmäisissä kennotyypeissä ja ovat edelleen yleisiä niiden korkean ionijohtavuutensa ansiosta. Huonona puolena niissä ovat vuoto-ongelmat ja väärin käytettyinä jotkin nykyisinkin käytössä olevista voivat väärinkäsittelyn seurauksena vapauttaa tulenarkoja ja syövyttäviä kaasuja. Nestemäiset elektrolyytit ovat usein enimmäkseen vettä. Veteen tai muuhun nesteeseen liuotetaan ionisoituvaa ainetta, esimerkiksi suolaa. Kiinteät elektrolyytit ovat uudempi keksintö. Vaikka yleisesti ottaen ne ovat turvallisempia ja vakaampia, on niillä tyypillisesti myös huonompi ionijohtavuus. Geeli-/polymeerielektrolyytit ovat kahden edellisen väliltä, omaten lisääntyntä turvallisuutta kiinteiden elektrolyyttien tapaan ja parempaa ionijoh-tavuutta nestemäisten elektrolyyttien tapaan. (Castrejon Suarez del Real, 2024a)

Anodi- ja katodimateriaalit vaikuttavat merkittävästi elektrolyytin valintaan. Elektrolyytin on mahdollistettava sähköisen tasapainotilan säilyminen ionien liikkumisen avulla olemalla kemiallisesti riittävän stabiili, jotta kennon jännite ei tuhoa sitä. Käytännön akuissa elektrolyytti on rajoittavana tekijänä käytettävien anodi-katodi parien valinnassa. (Castrejon Suarez del Real, 2024a)

### 3.5 Separaattori

Separaattorit sijaitsevat kennon positiivisen ja negatiivisen elektrodin välissä. Niiden tehtävänä on estää elektrodien keskinäinen fyysinen kosketus ja siten oikosulku. Samalla niiden on mahdollistettava ionien mahdollisimman vapaa kulkeutuminen elektrolyytissä elektrodien välillä. Tämä on välttämätöntä varauksen tasaamisen ja sähkökemiallisen kennon toimimisen kannalta. (Korthauer, 2017, s. 75)

Kennoissa käytettäviltä separaattoreilta vaaditaan laaja valikoima erilaisia ominaisuuksia. Seuraavassa on listattu ominaisuuksia, jotka separaattorin tulee täyttää mahdollisimman hyvin tietty akku ja sovellus huomioiden:

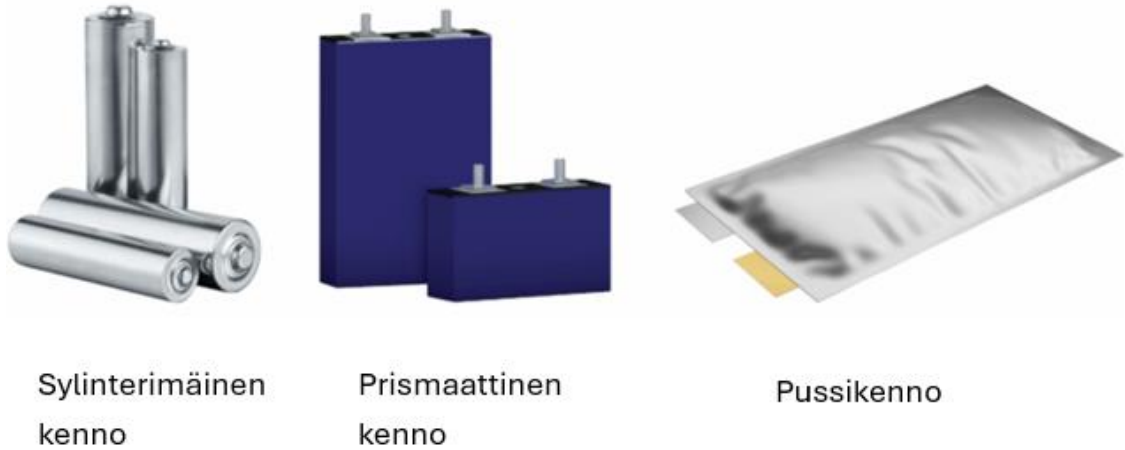
- Elektronien eriste
- Minimaalinen elektrolyyttivastus, korkea ionijohtavuus
- Mekaaninen ja dimensionaalinen vakaus
- Kemiallinen kestävyys
- Tehokas estämään hiukkasten siirtymistä
- Tasainen paksuudeltaan sekä muilta ominaisuuksiltaan

Eri kriteerien tärkeysjärjestys vaihtelee akkusovellusten mukaan. Monissa tapauksissa kyseessä on kompromissi eri vaatimusten suhteen, tavoitteena optimoida suorituskyky, turvallisuus, kustannukset jne. Edellä mainittujen yleisten vaatimusten lisäksi kullakin akkutyypillä on muita välttämättömiä vaatimuksia separaattorille hyvän suorituskyvyn ja turvallisuuden suhteen. Esimerkiksi litiumionikenoissa separaattorilla pitäisi olla sammutusominaisuus hyvän turvallisuuden takaamiseksi. (Arora & Zhang, 2004)

Pieni määrä virtaa, joka saattaa kulkea separaattorin läpi, on itsepurkautuvaa ja sitä esiintyy kaikissa akkutyypeissä vaihtelevissa määrin. Itsepurkautuminen tyhjentää lopulta akun varauksen pitkäaikaisen varastoinnin aikana. (Buchmann, 2023)

### 3.6 Kennon kokoonpano

Akusto tai akku koostuu yleensä useammasta kennosta, jotka ovat järjestetty moduuleihin. Moduulit puolestaan muodostavat akkupaketin. Pääasiallisesti akkupaketeissa käytettäviä kennoja on kolmea eri tyyppiä: prismaattisia, sylinterimäisiä ja pussimaisia. Kennotyypit on esitetty kuvassa 7. (Batteries News, 2024)



Sylinterimäinen  
kenno

Prismaattinen  
kenno

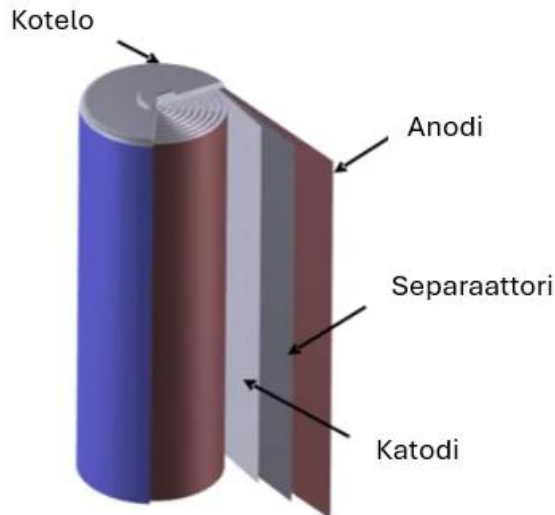
Pussikenno

**Kuva 7.** Kennotyypit (mukailtu lähteestä *Batteries News*, 2024).

### 3.6.1 Sylinterimäiset kennot

Sylinterimäisille kennoille on tunnusomaista niiden putkimainen muoto. Kuvassa 8 esitetään sylinterimäisen kennon rakenne. 18650 ja 21700 ovat tunnettuja sylinterimäisiä kennoja, joiden nimitykset tulevat kennojen ulkomittojen, halkaisijan ja pituuden, mukaan. Sylinterimäiset kennot muodostuvat lieriömäisestä kotelosta, jossa elektrodimateriaalit ovat kierretty spiraalimaisesti. Tämä mahdollistaa tehokkaan tilankäytön. (Ufine, 2024)

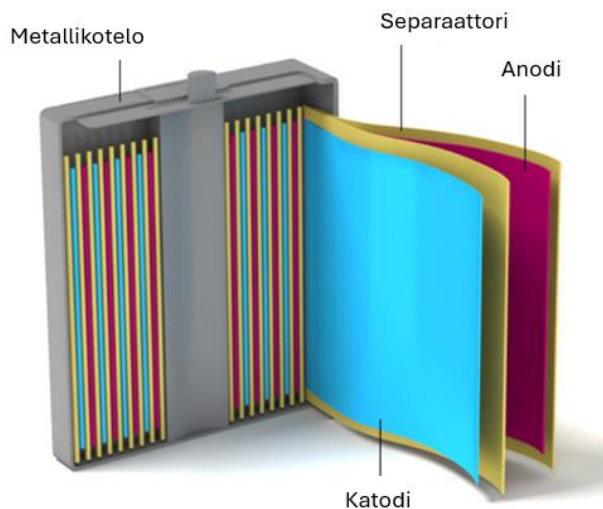
Sylinterimäiset kennot ovat olleet teollisessa tuotannossa yli kaksi vuosikymmentä, mikä on johtanut kehittyneisiin valmistusprosesseihin ja korkeaan tuotantotehokkuuteen. Tämän seurauksena niillä on alhaisemmat kustannukset muihin kennotyyppeihin verrattuna. Kustannustehokkuuden ohella tehokas lämmön poisjohtuminen on varsin merkittävä etu putkimaisilla kennoilla. Tämä ominaisuus lisää turvallisuutta suurta kuormitusta vaativissa käyttötilanteissa vähentämällä ylikuumentumisriskiä. Haittapuolia sylinterimäisillä kennoilla ovat kelausrakenteen alttius mekaanisille rasituksille ja muodonmuutoksille joissain tilanteissa. Lisäksi sylinterimäisten kennojen säteittäinen lämmönjohtavuus rajoittaa kelauserosten määrää, mikä johtaa pienempiin kennokohtaisiin kapasiteetteihin. Tämä johtaa useiden kennojen tarpeeseen suuremmissa sovelluksissa, mikä lisää monimutkaisuutta ja liitännöistä syntyviä häviöitä. (Ufine, 2024)



**Kuva 8.** Sylinterimäinen kenno (mukailtu lähteestä Ufine, 2024).

### 3.6.2 Prismaattiset kennot

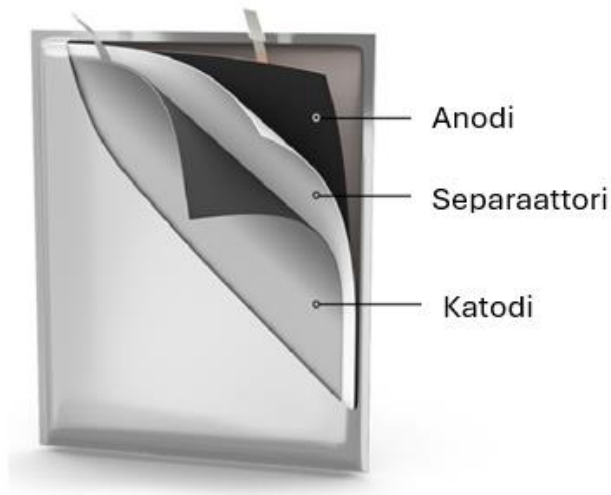
Prismaattisilla kennoilla on suorakaiteen muotoinen rakenne ja ne on suljettu jäykkiin koteloihin, kuva 9. Kerroksellisen rakenteensa ansiosta ne hyödyntävät tilan optimaalisesti. Tehokkaan tilankäytön lisäksi prismaattisten kennojen etuina ovat kotelon tarjoama vakaus sekä liitosmäärien vähäisempi tarve sylinterimäisiin kennoihin verrattuna. Prismaattisten kennojen huonoja puolia sylinterimäisiin kennoihin verrattuna ovat kalliimpi valmistus, tehottomampi lämmönhallinta sekä käyttösyklien pienempi määrä. (Buchmann, 2019)



**Kuva 9.** Prismaattinen kenno (mukailtu lähteestä Amp Nova, 2024).

### 3.6.3 Pussikennot

Pussikennot ovat erityinen kennotyyppi, jolle on ominaista joustava, pussimainen pakkaus ilman jäykkää koteloa. Kennon rakenne on esitetty kuvassa 10. Kennoissa elektrodit ovat ladottu ja suljettu kevyeen pussiin, joka on valmistettu esim. alumiinista ja polymeerilaminaateista. Kaikista kennotyypeistä pussikunno käyttää tilan tehokkaimmin, saavuttaen jopa 95 % pakkaustehokkuuden. Metallisen kotelon puuttuminen vähentää painoa, mutta kennoille tarvitaan tuki sekä tilaa laajentumiselle. Pussikennojen keveyden ja muokattavuuden ansiosta ne ovat suosittuja kannettavissa sovelluksissa. Standardoituja pussikennoja ei ole; jokainen valmistaja suunnittelee omansa. Pussikennot ovat yleensä litiumpolymeerikennoja. (Buchmann, 2019; Ufine, 2024)



**Kuva 10.** Pussikunno (mukailtu lähteestä J. Wang ym., 2023).

## 4. AKUN TEKNISET TIEDOT JA NIIHIN VAIKUTAVAT TEKIJÄT

Tyypillisiä parametreja, joita valmistajat ilmoittavat akuille, ovat muun muassa jännite, kapasiteetti sekä syklikesto. Akkujen tekniset tiedot selviävät valmistajien datalehdiltä, ja niiden ymmärtäminen on välttämätöntä akkujärjestelmän suunnittelun kannalta. Useat akuille annettavista arvoista ovat riippuvaisia monista eri tekijöistä. Ennen akun teknisten tietojen käsittelyä tässä luvussa paneudutaan akun suorituskykyyn vaikuttaviin tekijöihin.

### 4.1 Akun suorituskykyyn vaikuttavat rakenteelliset tekijät

Akkuun varastoituneen kemiallisen energian muuntaminen sähköenergiaksi on akun toiminnan perusta. Gibbs'n energian muutos kennoreaktiossa mahdollistaa akun sähköenergian tuottamisen ulkoiseen piiriin. Gibbs'n vapaaenergian lausekkeen avulla on mahdollista määrittää suurin mahdollinen osuus, joka akun kemiallisesta energiasta on muutettavissa sähköenergiaksi

$$\Delta G^0 = -nFE_0, \quad (3)$$

jossa  $\Delta G^0$  on Gibbs'n vapaan energian muutos,  $n$  on reaktiossa vaihdettujen elektronien lukumäärä,  $F$  on Faradayn vakio ja  $E_0$  on normaalipotentiali. (Linden & Reddy, 2011, s. 32; Ovejas & Cuadras, 2019)

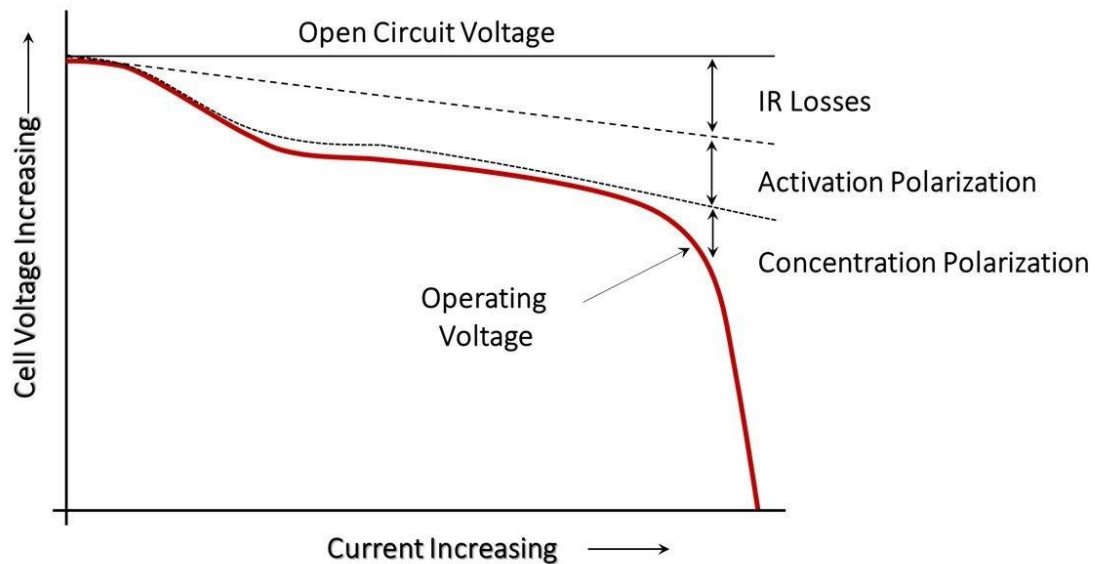
Olisi toivottavaa, että kaikki akkuun varastoitunut energia voitaisiin muuttaa hyödylliseksi sähköenergiaksi. Todellisuudessa aiheutuu kuitenkin häviöitä, jotka vähentävät akusta saatavan energian määrää. Häviöitä on havainnollistettu kuvassa 11. Niitä aiheuttavat seuraavat tekijät:

1. Aktivointipolarisaatio
2. Konsentraatiopolarisaatio
3. Ohminen polarisaatio

Aktivointipolarisaatio ohjaa sähkökemiallista reaktiota elektrodipinnalla ja liittyy varauksen siirtoprosessiin. Konsentraatiopolarisaatio johtuu reaktantin pitoisuuden tilallisista vaihteluista joko elektrodilla tai elektrolyyttiliuoksessa. Periaatteessa aktivointipolarisaatio ja konsentraatiopolarisaatio voidaan laskea useilla teoreettisilla yhtälöillä, jos tietyt sähkökemialliset parametrit ja massansiirtokertoimet ovat saatavilla. Käytännössä näiden arvojen määrittäminen on kuitenkin vaikeaa elektrodien monimutkaisen fyysisen rakenteen

vuoksi. Kuten aiemmassa luvussa oli esillä, useimmat elektrodit valmistetaan käyttämällä aktiivista materiaalia, sideaineita, suorituskykyä parantavia lisäaineita sekä johtavaa kalvoa, jotka yhdessä muodostavat huokoisen rakenteen. (Linden & Reddy, 2011, s. 42–46)

Ohminen polarisaatio, jota kutsutaan myös IR-häviöksi, aiheutuu akun sisäisestä resistanssista aiheuttaen jännitehäviön akkua purettaessa. Tämä sisäinen resistanssi muodostuu elektrolyytin, elektrodien, aktiivisen materiaalin, virrankerääjien, elektrodien sähköisten liittimien sekä aktiivisen aineen ja virrankerääjien välisestä vastuksesta. Jännitehäviö noudattaa Ohmin lakia, ollen suoraan verrannollinen akun kuormitusvirtaan. (Linden & Reddy, 2011, s. 42)



**Kuva 11.** Kennon polarisaatio toimintavirran funktiona (mukailtu lähteestä Jeevarajan, 2021).

Nämä kaikki polarisaatiovaikutukset kuluttavat osan energiasta, joka vapautuu hukkalämpönä. Kaikki saatavilla oleva energia ei siten muunnu kokonaisuudessaan sähköenergiaksi. Kennon ollessa kytkettynä ulkoiseen kuormaan, kennon jännite saadaan seuraavalla kaavalla (Linden & Reddy, 2011, s. 42)

$$E = E_0 - [(\eta_a)_a + (\eta_a)_c] - [(\eta_c)_a + (\eta_c)_c] - iR_i = iR, \quad (4)$$

missä

- $E_0$  = avoimen piirin jännite
- $(\eta_a)_a, (\eta_a)_c$  = anodilla ja katodilla tapahtuva aktivointipolarisaatio
- $(\eta_c)_a, (\eta_c)_c$  = anodilla ja katodilla tapahtuva konsentraatiopolarisaatio

- $R$  = ulkoinen kuorma
- $i$  = kennon käyttövirta kuormalla
- $R_i$  = kennon sisäinen resistanssi

Edellä esitetyn perusteella, voidaan todeta, että akun tuottama käyttöjännite pienenee kemiallisista syistä sekä akun sisäisen IR-häviön vuoksi. Ainoastaan hyvin pienillä käyttövirroilla, jolloin polarisaatio ja IR-häviöt ovat vähäisiä, kenno voi toimia lähellä avoimen piirin jännitettä ja tuottaa suurimman osan teoreettisesti saatavilla olevasta energiasta. Vaikka akun saatavilla oleva energia riippuu kummankin elektrodin perussähkökemiallisista reaktioista, on monia tekijöitä, jotka vaikuttavat varauksen siirtoreaktion ja diffuusion nopeuksiin ja siten energiahäviön suuruuteen. Näihin tekijöihin kuuluvat mm. elektrolyytin koostumus ja suunnittelu, elektrolyytin johtavuus sekä erotinten luonne ja ominaisuudet. Seuraavassa on listattuna olennaisia asioita, jotka ovat tärkeitä suunniteltaessa akkuja, jotta saavutetaan korkea hyötysuhde mahdollisimman vähäisillä häviöillä (Castrejon Suarez del Real, 2024b)

- Elektrolyytin johtavuuden tulisi olla riittävän korkea.
- Elektrolyyttisuolan ja liuottimien tulisi olla kemiallisesti stabiileja, jotta ne eivät reagoi suoraan anodin tai katodin materiaalien kanssa.
- Elektrodireaktion nopeuden sekä anodilla että katodilla tulisi olla riittävän nopea, jotta aktivointipolarisaatio ei ole liian suuri, mikä tekisi kennosta käyttökelvottoman. Yleinen tapa vähentää varauksen siirtopolarisaatiota on käyttää huokoista elektrodirakennetta.

Akuston suorituskykyyn vaikuttaa sen sisäinen rakenne. Esimerkiksi elektrodien rakenteet vaikuttavat akustolta saatavaan enimmäistehoon ja kennon fyysiseen kestävyyskykyyn. Samalla tavalla elektrolyytin valinta voi vaikuttaa molempiin, sekä enimmäistehoon että kestävyyskykyyn. Elektrolyytin koostumuksen muuttaminen saattaa mahdollistaa akuston toiminnan alhaisemmissa lämpötiloissa, mutta tämä voi johtaa enimmäistehon laskuun tai kustannusten nousuun. Geelimäisen tai kiinteän elektrolyytin käyttö voi parantaa akun kestävyyskykyä fyysisiä vaurioita vastaan. (Castrejon Suarez del Real, 2024b)

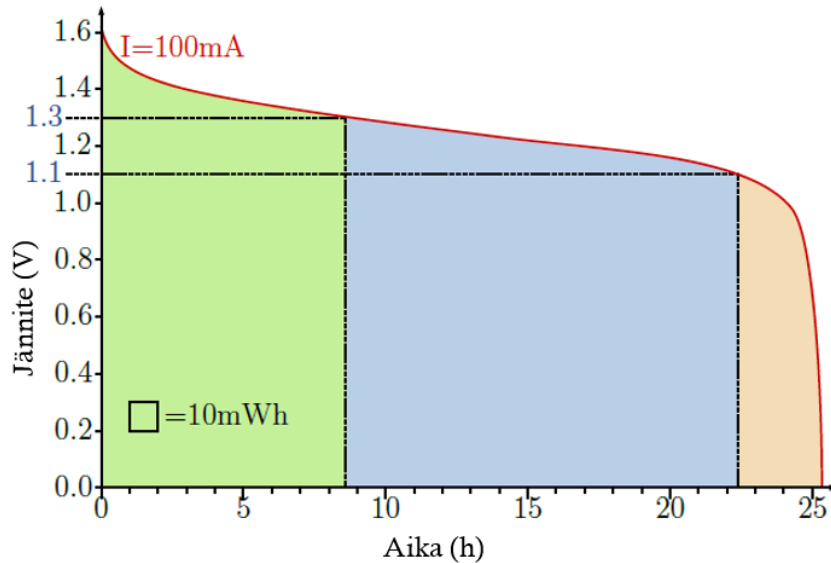
## 4.2 Jännite

Akkukennon lähtöjännite riippuu akkukemiasta sekä akun varaustilasta. Elektrodimateriaalit määräävät jännitealueen ja elektrodien sähkökemiallinen potentiaaliero muodostaa kennon kokonaisjännitteen. (Castrejon Suarez del Real, 2024b)

Kennon tai akun jännitteestä puhuttaessa voidaan tarkoittaa useaa eri jännitettä (Linden & Reddy, 2011, s. 81):

1. Teoreettinen jännite on anodi- ja katodimateriaalien, elektrolyytin koostumuksen sekä lämpötilan (yleensä ilmoitettu lämpötilassa 25 °C) funktio.
2. OCV (engl. open-circuit voltage) eli avoimen piirin jännite on kuormittamattoman kennon/akun jännite napojen välillä. Tämä jännite on yleensä lähellä teoreettista jännitettä.
3. CCV (engl. closed-circuit voltage) on jännite napojen välillä kuormitustilanteessa.
4. Nimellisjännite on yleisesti hyväksytty jännitteen arvo akun/kennon tyyppilliseksi arvoksi (esim. 12 V:n lyijyakku). Se on tyyppillisesti akun jännitteestä laskettu keskiarvo lataus-/purkausjakson aikana. Nyökkisääntönä voidaan pitää, että todellinen jännitealue on n.  $\pm 10$  % nimellisjännitteestä, riippuen akkukemiasta.
5. Käyttöjännitteellä tarkoitetaan tyyppillistä jännitettä tai jänniteväliä akun/kennon purkauksen aikana.
6. Katkaisu- tai loppujännite on jännite, johon purkaus päättyy. Yleensä siihen mennessä akun/kennon kapasiteetista suurin osa on käytetty. Katkaisujännitteen arvo määritellään akun valmistajan toimesta, ja akun ohjausjärjestelmät käyttävät yleensä tätä jännitettä turvallisuusrajana estäen akun ylipurkautumisen. Katkaisujännite voi riippua myös sovelluksen vaatimuksista.

Mitä suurempi on akun varaustila, sitä suurempi on myös lähdejännite. Yleisimmin jännite/varaustilan käyttäytyminen purkausajan funktiona muistuttaa S-kirjainta, jossa on jyrkkä nousu akun lähestyessä täyttä varaustilaa ja jyrkkä pudotus akun varaustilan laskeessa. Tätä on havainnollistettu kuvassa 12. Jännitteen käyttäytymisissä on eroja akkukemioiden välillä. (Castrejon Suarez del Real, 2024b)



**Kuva 12.** Akun tyypillinen purkauskäyrä (mukailtu lähteestä *Inductiveload*, 2016).

Latausjännitteellä tarkoitetaan akun lataamiseen käytettävää jännitettä. Akun latautuminen edellyttää, että latausjännite on avoimen piirin jännitettä suurempi. Korkeat jännitteet lataavat akun nopeammin, mutta ne saattavat myös vahingoittaa akkua. Nopeaa latausta käytetään yleensä vain osittaisen varaustason saavuttamiseksi, jotta vältetään akulle aiheutuva liiallinen vahinko. Erilaiset lataustavat ovat esitetty tarkemmin luvussa viisi. (Castrejon Suarez del Real, 2024b)

### 4.3 Virta ja teho

Akun teho, syöttö- tai antoteho, määräytyy sen virran ja jännitteen perusteella. Akun kemia ja sisäinen rakenne vaikuttavat siihen, kuinka suuret lataus- ja purkausvirrat akku kestää. Valmistajien ilmoittamat enimmäisvirrat ovat yleensä niin sanottuja ”pehmeitä rajoja”. Vaikka akku pystyy nämä rajat ylittämään, voi se johtaa akun heikkenemiseen, vaurioihin tai ylikuumentumiseen. Litiumioniakuissa voi seurauksena olla pahimmillaan lämpökarkkaaminen ja akkupalo. (Castrejon Suarez del Real, 2024b)

Virtarajojen yhteydessä on syytä huomioida eri kuormitukset: jatkuva virta ja huippuvirta. Jatkuvan virran raja on sellainen, ettei ylikuumentumista tapahdu eikä kennot heikkene enenaikaisesti. Huippuvirran raja on tätä korkeampi ja se sallitaan vain lyhyen ajan, tyypillisesti 10 sekuntia. (Andrea, 2020, s. 25)

### 4.3.1 Varaus- ja purkausnopeus, C-arvo

Yleinen menetelmä akun varaus- ja purkausnopeuden osoittamiseksi on C-arvo. Sillä tarkoitetaan akun lataus- tai purkausvirran suhdetta akun maksimikapasiteettiin. Toisin sanoen C-arvo ilmaisee akun varauksen muuttumisnopeutta. C-arvon yksikkö on tunnin käänteisluku, mutta yleisesti käytetään vain yksikköä C. C-arvo saadaan kaavasta

$$I = MC_n, \quad (5)$$

jossa  $I$  on purkaus-/latausvirta ampeereina,  $C$  on akun nimelliskapasiteetti ampeeritunteina,  $n$  on aika tunteina, jolle nimelliskapasiteetti on ilmoitettu ja  $M$  on kapasiteetin kerannainen. Esimerkiksi kapasiteetiltaan 250 mAh:n akulle, jota ladataan 50 mA:n virralla  $C_n$ -arvoksi saadaan 0,2 C. (Linden & Reddy, 2011, s. 83)

Andrea (2020, s. 7–8) huomauttaa, että C-arvo-termin kanssa tulee olla tarkkana. Hän mainitsee, että akkujen datalehdissä ja myyntiesitteissä puhutaan usein arvosta, jolla tarkoitetaan valmistajan ilmoittamaa suurinta purkausvirtaa, jota akku on suunniteltu kestävänsä. Hän kritisoi termiä siitä, että se on lähinnä markkinointitermi, eikä se kerro mitään tarkempaa akun ominaisuuksista suurilla virroilla purettaessa. Se ei esimerkiksi kerro, kuinka kauan akusta saa ottaa mainitun suuruista virtaa.

Alan kirjallisuudessa (A Guide to Understanding Battery Specifications, 2024; Castrejon Suarez del Real, 2024b; Linden & Reddy, 2011) käytetään C-arvon lisäksi termiä E-arvo, joka kuvaa akun purkaustehoa. E-arvo 1 E vastaa 100 Wh:n akulle 100 W:n purkaustehoa, eli akun kapasiteetti tyhjenee yhden tunnin aikana. Vastaavasti 5 E arvo samalle akulle vastaa 500 W:n tehoa. E-arvo on tarkempi tapa kuvata akusta saatavaa tehoa kuin C-arvo, sillä se huomioi jännitteen laskun akun varauksen yhteydessä. Käytettäessä vakio C-arvoa, akun teho vähenee jännitteen laskiessa, mutta vakio E-arvoa käytettäessä virran täytyy kasvaa kompensoidakseen jännitteen laskua. Etenkin suunniteltaessa laitteita, joissa teho on kriittisenä tekijänä, maksimimääräisen E-arvon käyttäminen on hyödyllistä. (Castrejon Suarez del Real, 2024b)

### 4.3.2 Ominaisteho ja tehotiheys

Ominaisteho ja tehotiheys liittyvät tehon tuotantoon massa- ja tilavuusyksikköä kohden. Volumetrinen tehotiheys kuvaa tehoa, jonka akku voi antaa tilavuusyksikköä kohden (W/l). Tämä arvo määrittelee, kuinka paljon tilaa akku vie täyttääkseen tietyt tehovaatimukset. Tämä on tärkeää laitteissa, joissa tilantarve on pieni. Ominaisteho puolestaan kertoo akun antaman tehon painoyksikköä kohden (Wh/kg). Dell ja Rand (2001, s. 26) huomauttavat,

että akun teho määräytyy yhtä paljon sekä akun sisäisen kennosuunnittelun että valitun kemian perusteella; tietyllä kemialla on mahdollista suunnitella kennoja, joiden teho vaihtelee huomattavasti. (Castrejon Suarez del Real, 2024b; Dell & Rand, 2001, s. 26–27)

Sovelluksen mukaan, tarve voi olla jatkuvalla teholla, huipputeholla lyhyen ajanjakson ajan tai tehopulsseille. Korkean tehotiheyden omaavat akut voivat purkautua nopeasti tuottaen tehonpurkauksia, joita tarvitaan esimerkiksi sähköauton kiihdyttämisessä. Vastaavasti ne voivat myös vastaanottaa energiaa nopeasti. Nämä seikat tekevät korkean tehotiheyden akuista ihanteellisia sovelluksiin, joissa vaaditaan nopeaa latausta, kuten jarrutusenergian talteenotto jarrutusilanteissa. (Castrejon Suarez del Real, 2024c; Dell & Rand, 2001, s. 27)

Akun tehon ja energian määrän välillä täytyy usein tehdä kompromissi, sillä mitä suurempi teho on käytettävissä, sitä vähemmän energiaa akkuun on mahdollisuus varastoida. Perimmäisenä syynä tälle on korkean tehon vaatima kennorakenne. Alhainen sisäinen vastus ja matala elektrodin polarisaatio ovat edellytykset korkean tehon omaavalle kennolle, mikä puolestaan edellyttää ohuita elektrodeja, joilla on suuri pinta-ala ja jotka ovat pakattu tiiviisti yhteen. Tällaisessa kennorakenteessa inertit virrankerääjät, separaattorit yms. muodostavat suuremman osan kennon massasta ja tilavuudesta, kun taas aktiiviset materiaalit edustavat pienempää osaa. Näin ollen suuren tehon kennon ominaisenergia ja energiatiheys ovat pienemmät kuin vastaavan kemian perinteisen kennon. (Dell & Rand, 2001, s. 26)

## 4.4 Energiasisältö

Akkujen ensisijainen tarkoitus on toimia energian varastointilaitteina. Akun energiasisällöllä viitataan sähköenergian määrään, jonka akku voi varastoida ja tarjota käyttöön. Tämä energiasisältö määräytyy kahden keskeisen parametrin perusteella, akun kapasiteetin sekä sen hetkisen akun sisältämän energiamäärän. (Castrejon Suarez del Real, 2024b)

### 4.4.1 Kapasiteetti ja energiakapasiteetti

Akun kapasiteetilla tarkoitetaan akun energia- tai varausmäärää, jonka sieltä voi tietyissä määritellyissä olosuhteissa purkaa. Kapasiteetin SI-järjestelmän (ransk. *Système international d'unités*) mukainen yksikkö on ampeerisekunti eli coulombi, joka kuvaa yhden ampeerin kuljettamaa varauksen määrää sekunnin aikana. Käytännöllisempää on kuitenkin varauksen määrän sijaan käyttää virtaa, joten yleensä yksikkönä käytetään ampeerituntia (Ah). (Linja-Aho, 2022, s. 12–13)

Kapasiteetilla viitataan usein nimelliskapasiteettiin, joka osoittaa akusta saatavan varauksen määrän purettaessa akkua täyden varauksen tilasta tyhjäksi (ennalta asetettuun katkaisujännitteeseen) nimellisellä C-arvolla. Käytettäessä vakiovirtaa, kapasiteetti (ampeeeritunteina) lasketaan seuraavalla kaavalla

$$Q = It, \tag{6}$$

jossa  $Q$  on kapasiteetti,  $I$  on purkausvirta ja  $t$  on aika. On tärkeää huomioida, että akun kapasiteetti laskee, jos sitä puretaan nimellistä C-arvoa suuremmilla C-arvoilla. (Castrejon Suarez del Real, 2024b)

Arvioitaessa akun kapasiteettia ampeeritunneissa (Ah), kapasiteetti on vertailukelpoinen vain tapauksissa, joissa akkujen nimellisjännitteet ovat samat. Tämä johtuu siitä, että kapasiteetti ampeeritunteina ilmoitettuna ei osoita suoraan akun sisältämää energiamäärää. Esimerkiksi 12 V:n ja 24:n voltin akut voivat molemmat olla kapasiteetiltaan 10 Ah, mutta ne eivät silti varastoi samaa määrää energiaa. Tällöin energiakapasiteetti, yksikkönä Wh tai kWh, on hyödyllinen tieto akkujen keskinäisessä vertailussa. Koska sovelluksen teho vaatimukset ovat usein ennakoitavissa, on ampeerituntien sijasta wattituntien avulla helpompi arvioida, kuinka kauan akku pystyy tuottamaan virtaa. (Castrejon Suarez del Real, 2024b; Linja-Aho, 2022, s. 13)

#### 4.4.2 Akun varaustila, SoC (engl. State of Charge)

Akun varaustila ilmaisee akun senhetkisen varaustason. Se ilmaistaan tyypillisesti prosentteina akun suunnitellusta maksimi ja minimivarauksen erotuksesta. SoC-arvon ollessa 100 % akku on täynnä ja arvolla 0 % akku on tyhjä. Linja-Aho (2022, s. 14) huomauttaa, että akkua on mahdollista purkaa myös varaustilan 0 % jälkeen, mutta se voi vaurioittaa akkua. Toisin sanoen, SoC-arvon ollessa 0 % akku on purettu niin tyhjäksi kuin se on suunniteltu purettavan, mutta jännitteetön se ei vielä ole. (Linja-Aho, 2022, s. 13–14)

#### 4.4.3 Purkaussyvyys, DoD (engl. Depth of Discharge)

Purkaussyvyys on varaustilan vastakohta. Täyteen ladatusta akusta purettua kapasiteettia verrataan akun nimelliskapasiteettiin. Akun ollessa täynnä DoD-arvo on nolla, ja akkua purettaessa sen arvo kasvaa. Se ilmoitetaan yleensä prosentteina tai ampeeritunteina. Purkaussyvyden ollessa 80 % tai sen yli, käytetään termiä syväpurkaus. (Castrejon Suarez del Real, 2024b)

#### 4.4.4 Ominaisenergia ja energiatiheys

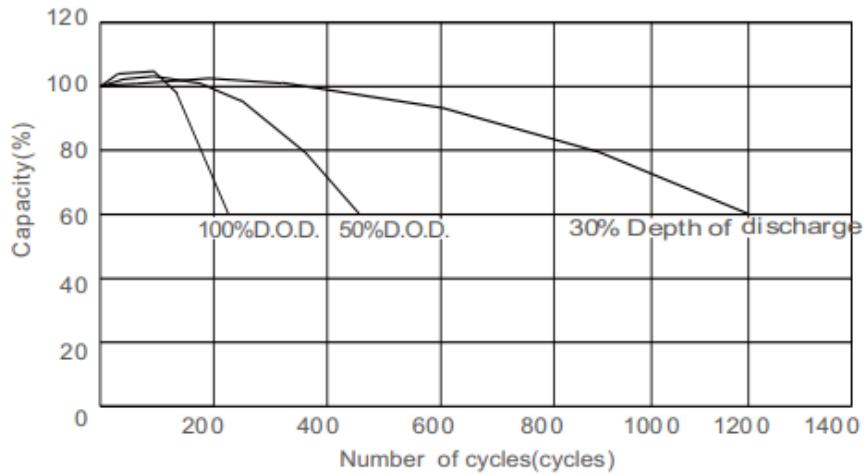
Akun energiaominaisuudet ilmoitetaan sen perusteella, kuinka paljon energiaa akku varastoi paino- tai tilavuusyksikköä kohden. Akun ominaisenergialla tarkoitetaan kapasiteettia massayksikköä kohden (Wh/kg) ja energiatheydellä kapasiteettia tilavuusyksikköä kohden (Wh/l). Sekä ominaisenergia että energiatiheys määräytyvät kennokemian ja kennorakenteen sekä akkupakkauksen kokoonpanon perusteella. Nämä parametrit ovat erityisen tärkeitä silloin, kun sovelluksissa on paino- tai tilarajoituksia. Sovelluksen mukaan joko ominaisenergia tai energiatiheys on suunnittelun kannalta kriittisempi. Linja-Aho (2022, s. 23) väittää, että esimerkiksi henkilöautokäytössä ja kannettavassa elektroniikassa tilavuudesta muodostuu suurempi ongelma kuin massasta. Hänen mukaansa paikallisakustoissa kumpikaan ei yleensä ole ongelmana. (Castrejon Suarez del Real, 2024c; Linja-Aho, 2022, s. 23)

#### 4.5 Akun elinkaari

Akun käyttöikä on rajallinen. Akun kesto voidaan määrittää joko lataus-purkaussykliden tai kalenterikuukausien keston mukaan. Akun heikkeneminen tapahtuu, kun akkua ladataan tai puretaan, mutta akku heikkenee myös käyttämättömänä. Tämä vaikuttaa pääasiallisesti kahteen ominaisuuteen: kapasiteettiin ja tehoon. Kapasiteetin heikkeneminen tarkoittaa akun kykyä varastoida vähemmän varausta kuin aiemmin, ja tehon heikkeneminen ilmenee akusta saatavan tehon laskuna. (Castrejon Suarez del Real, 2024b)

##### 4.5.1 Syklikesto

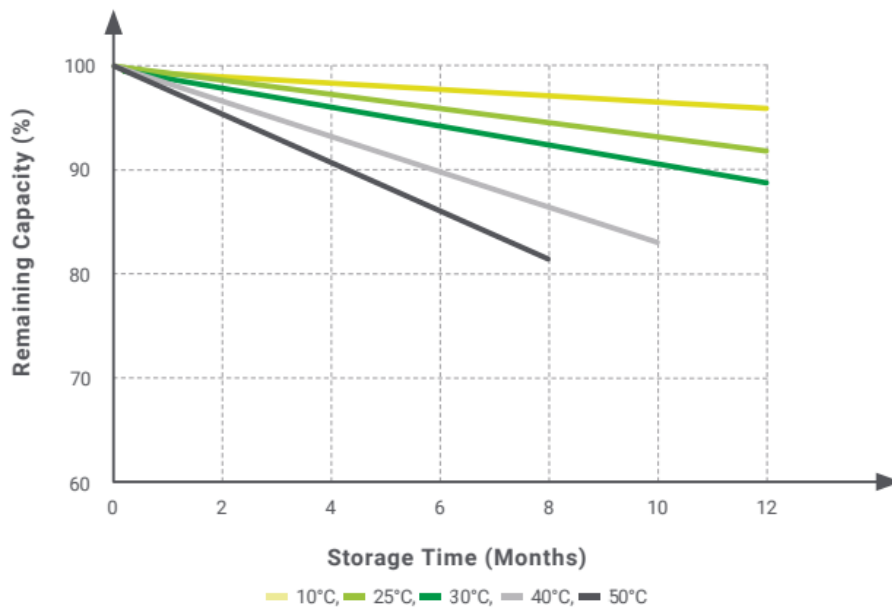
Akun syklikestolla tarkoitetaan akun kestämiä täysiä lataus-purkaussyklejä ennen kuin se on käyttöikänsä lopussa. Sitovaa standardia käyttöiän lopun määrittelylle ei ole. Tyypillisesti valmistajat määrittelevät sen olevan akun kapasiteetin alennettua 80 %:iin alkuperäisestä arvosta (ks. kohta 4.5.3). Akkuja vertailtaessa on hyvä huomioida, että eri valmistajat saattavat ilmoittaa syklikeston erilaisilla sykleillä. Datalehdistä yleensä selviää, minkälaisilla sykleillä ilmoitettu syklikesto on saatu. Akulle on voitu käyttää esimerkiksi 80 % purkaussyvyyttä tai akkua on voitu purkaa tiettyyn jänniterajaan asti. Lisäksi syklikestoon vaikuttavat erilaiset käyttöolosuhteet, erityisesti lämpötila ja kosteus. Kuva 13 havainnollistaa valmistajan ilmoittamaa syklikestoa AGM-akulle (engl. absorbent glass mat). Kyseiseltä datavivulta ei selviä olosuhteita, joissa syklikesto on saatu. (Linja-Aho, 2022, s. 24)



**Kuva 13.** Purkaussyvyyden vaikutus syklikeston (mukailtu lähteestä Suomen akut, 2024a).

#### 4.5.2 Itsepurkautuvuus (engl. self-discharge)

Akun varaustila heikkenee, vaikka akkua ei kuormitettaisi. Tämä varaustilan heikkeneminen ilmaistaan itsepurkautuvuusprosentin avulla. Tyypillisesti itsepurkautuvuus ilmoitetaan kuukauden ajanjaksolle, mutta myös muita ajanjaksoja käytetään riippuen akkutyyppistä ja valmistajasta. Purkautumisnopeus riippuu akun kemiasta, sen rakenteesta ja erityisesti varastointilämpötilasta. Lämpötilan noustessa itsepurkautumisnopeus yleensä kasvaa. Kuva 14 havainnollistaa litiumioniakun itsepurkautumista eri lämpötiloissa ajan funktiona. Itsepurkautuvuuden avulla voidaan helposti arvioida, kuinka kauan akku kestää varastointia ilman akun tyhjenemistä. (Dell & Rand, 2001, s. 29; Linja-Aho, 2022, s. 25)



**Kuva 14.** Litiumioniakun itsepurkautuvuus ajan funktiona eri lämpötiloissa (mukailtu lähteestä Suomen akut, 2024b).

### 4.5.3 Akun kuntotaso, SoH (engl. State of Health)

Accun kuntotasoa käytetään arvioimaan akun nykyistä kuntoa verrattuna sen alkuperäiseen kuntoon. Se ilmaisee akun jäljellä olevaa maksimikapasiteettia. Kun akun SoH-arvo on laskenut tietyn rajan alapuolelle, sen katsotaan saavuttaneen käyttöikänsä lopun. Yleisesti rajana pidetään 80 % alkuperäisestä kapasiteetista, mutta raja-arvo voi vaihdella akun tyyppiin ja sen suunnitellun käyttötarkoituksen mukaan. Kun tämä ennalta määrätty raja ylittyy, akku katsotaan käyttökelvottomaksi ja se poistetaan käytöstä. SoH-arvoa käytetään eliniän arvioimisen lisäksi akun lataus- ja purkausparametrien säätämiseen akun suorituskyvyn optimoimiseksi. (Castrejon Suarez del Real, 2024b)

### 4.5.4 Akun käytön vaikutukset sen kuntoon

Accun suorituskyky heikkenee käytön myötä sekä ajan kuluessa. Keskeisimmät tekijät, jotka vaikuttavat akun heikkenemiseen ovat (Castrejon Suarez del Real, 2024b):

- Lataus- ja purkausnopeus, C-arvo
- Syklien määrä
- Lämpötila
- Lataustaso

Suuret C-arvot sekä lataus-purkausjaksojen lukumäärä ovat keskeisiä tekijöitä, jotka vaikuttavat akun kapasiteetin menetykseen. Menetyks voi olla seurausta useista eri vaikutuksista, mm. aktiivisten materiaalien liukenemisestä sekä elektrodien rakenteellisista muutoksista. Lämpötila on edellisten ohella merkittävä tekijä, joka vaikuttaa akun ikääntymiseen. Väliaikaisesti lämpötilan nousu voi parantaa akun suorituskykyä kiihdyttämällä akkujen toimintaan liittyviä reaktioita, mutta korkeat lämpötilat lisäävät hajoamista aiheuttavien reaktioiden nopeutta rajoittaen akun syklikestoa. Suuren virran ottaminen akusta nostaa akun sisäistä lämpötilaa sisäisen resistanssin vuoksi lisäten akun lämpöhäviöitä. Liian korkean lämpötilan ohella myös liian matala akun käyttölämpötila nopeuttaa akun heikkenemistä. Esimerkiksi litiumioniakuissa litiumin pinnoittuminen elektrodille kiihtyy, mikä johtaa kapasiteetin laskemiseen. Litiumioniakkujen optimaalinen käyttölämpötila syklien määrän maksimoimiseksi on tyyppillisesti välillä 10–60 °C. Accun lataustaso vaikuttaa myös akkujen heikkenemiseen. Samoin kuin lämpötilalla, myös lataustasolla on optimialue akun suorituskyvyn menetyksen rajoittamiseksi. Litiumioniakuilla tämä alue on 20–90 %. Varastoinnissa käytetään usein 60 % SoC-arvoa litiumioniakuille ja 100 % SoC-arvoa lyijyakuille akun heikkenemisen estämiseksi. (Castrejon Suarez del Real, 2024b)

## 5. AKUN LATAUSTEKNIIKAT

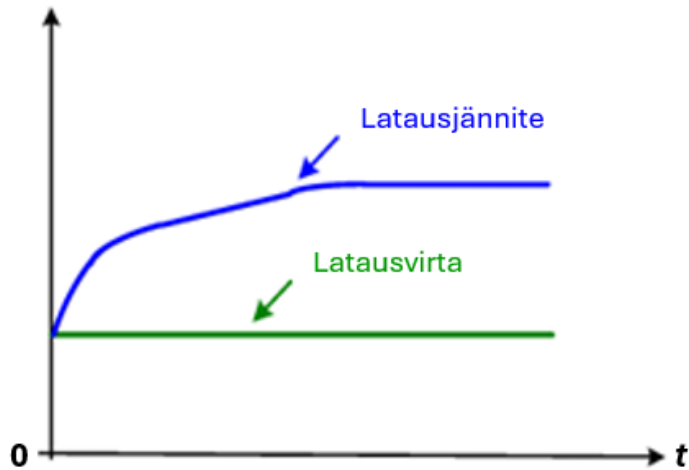
Akun lataustekniikat ovat kehittyneet vastaamaan erilaisia akkuteknologioita ja niiden erityisiä lataustarpeita. Lataustapa kuvaa laturin käyttämää menetelmää akun lataamiseksi. Lataustavasta selviää miten ulkoisen laturin jännitteen ja virran muuttuminen latausprosessin aikana vaikuttavat latauksen tehokkuuteen. Eri lataustavat mahdollistavat yleensä vaihtelevan latausnopeuden. Oikean lataustekniikan valinta on keskeistä akun suorituskyvyn, käyttöiän ja turvallisuuden varmistamiseksi. (Castrejon Suarez del Real, 2024d)

### 5.1 Vakiovirtalataus

Vakiovirtalatauksessa akkua ladataan vakiovirralla (CC, engl. constant current) koko latausprosessin ajan niin kauan, kunnes akun jännite saavuttaa tietyn kynnyksarvon. Jännitteen ja virran käyttäytymistä on havainnollistettu kuvassa 15. Tämä menetelmä on varsin yleinen ja sitä käytetään tyypillisesti akuissa, joissa on sarjaan kytketyt kennot. Ylläpitämällä tasaista virtaa saavutetaan parempi lataustehokkuus verrattuna muuttuva virtaisiin lataustapoihin. (Castrejon Suarez del Real, 2024d)

Etuna vakiovirtalatauksessa on latausvirran säätämisen mahdollisuus akun tai sovelluksen tarpeet huomioiden. Suuremmat virrat mahdollistavat nopean latauksen ja pienemmillä latausvirroilla voidaan pidentää akun käyttöikä. (Castrejon Suarez del Real, 2024d)

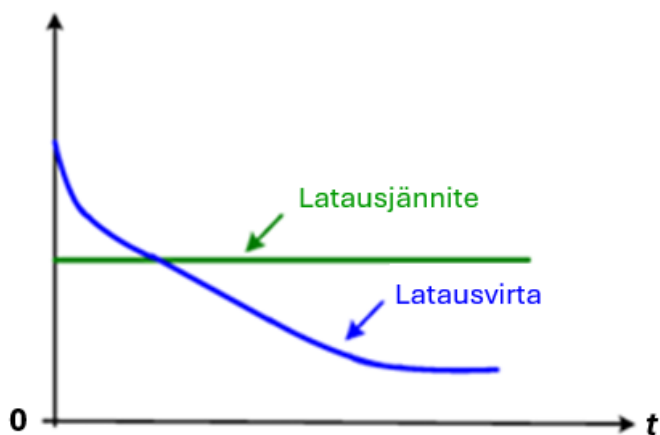
Tällä lataustavalla akku latautuu nopeasti latauksen alkuvaiheessa, kun akun jännite on alhainen. Akun lähestyessä täyttä latausta sen sisäinen vastus kuitenkin kasvaa, ja jatkuva korkea virta saattaa aiheuttaa ylikuumenemista tai vaurioita. Tästä syystä käytännön sovelluksissa vakiovirtalatausta käytetään yleensä muiden latausmenetelmien kanssa tasapainottamaan eri tekijöitä, kuten lämpötilan hallintaa ja jännitteen muutoksia. (Castrejon Suarez del Real, 2024d)



**Kuva 15.** Vakiovirtalatauksen latauskäyrä (mukailtu lähteestä Tsai ym., 2015).

## 5.2 Vakiojännitelataus

Vakiojännitelataustavalla ladattaessa, akkua ladataan vakiojännitteellä (CV, engl. constant voltage). Syötetty latausvirta määräytyy laturin ja akun välisen jännite-eron mukaan. Latauksen edetessä akun jännite kasvaa, jolloin jännite-eron pienenemisen seurauksena myös latausvirta pienenee kuvan 16 mukaisesti. Näin latausprosessi hidastuu akun jännitteen noustessa ja lähestyessä asetettua tasoa. Menetelmä auttaa ylläpitämään vakaita jännitetasoja koko latausprosessin ajan, mikä auttaa estämään ylilatausta. Tämä on erityisen tärkeää herkille akkutyypeille, kuten litiumioni- ja litiumpolymeeriakuille. Nämä akkutyyppit ovat alttiita ylilataukselle, mikä voi johtaa ylikuumenemiseen, käyttöiän lyhenemiseen ja mahdollisiin turvallisuusriskeihin. (Castrejon Suarez del Real, 2024d; Dell & Rand, 2001, s. 38)

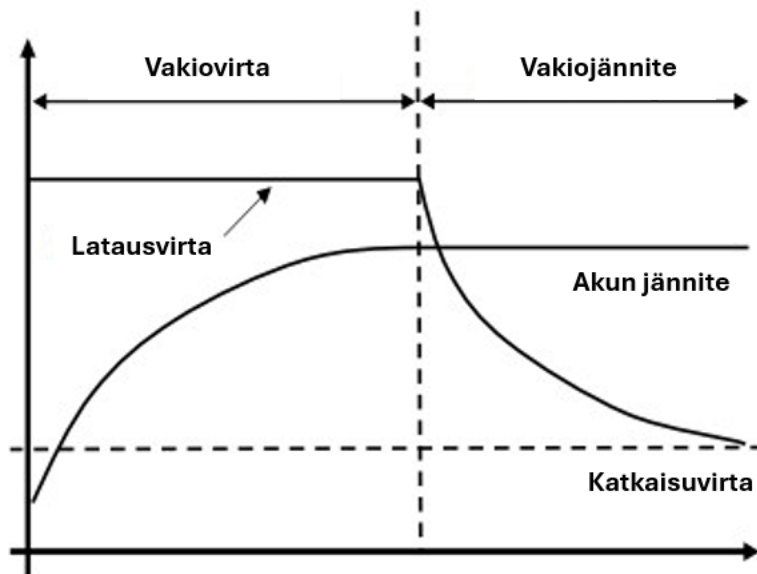


**Kuva 16.** Vakiojännitelatauksen latauskäyrä (mukailtu lähteestä Tsai ym., 2015).

### 5.3 Vakiovirta- ja vakiojännitelataus

Vakiovirran ja vakiojännitteen (CC-CV) lataustavassa latausvirta pidetään vakiona, kunnes akun jännite saavuttaa ennalta määritetyn arvon, tyypillisesti n. 90–95 % akun nimellisjännitteestä. Tämän jälkeen siirrytään vakiojännitelataukseen, jossa jännite pidetään vakiona ja virran annetaan laskea eksponentiaalisesti. Lataustapa on esitetty kuvassa 17. Akku katsotaan täyteen ladatuksi virran saavuttaessa hyvin alhainen ennalta määritetty raja-arvo, katkaisuvirta. (Castrejon Suarez del Real, 2024d; Dell & Rand, 2001, s. 38–39)

Tämä latausmenetelmä on suunniteltu akun lataustehokkuuden parantamiseksi ja akun kulumisen minimoimiseksi. Vakiovirta- ja vakiojännitelataus ei kuitenkaan sovellu kaikille akkukemioille, eikä se toimi välttämättä hyvin ikääntyneiden akkujen kanssa, joilla on suuri sisäinen resistanssi. Lisäksi lämpötilaherkät akut saattavat tarvita erityisiä latausalgoritmeja prosessin optimoimiseksi äärimmäisissä olosuhteissa. (Castrejon Suarez del Real, 2024d)



**Kuva 17.** Vakiovirta- ja vakiojännitelatauksen latauskäyrä (mukailtu lähteestä Jarid ym., 2021).

### 5.4 Vakioteholataus

Vakioteholatauksessa akun lataukseen käytettävä teho pidetään vakiona latausprosessin ajan. Latausjännitettä tai -virtaa säädetään siten, että latausteho pysyy vakiona akun varaustilan muuttuessa. Latauksen alkuvaiheessa, jolloin akun jännite on alhainen, käytetään suurempaa virtaa tarvittavan tehon ylläpitämiseksi. Akun jännitteen kasvaessa virtaa vähennetään asteittain tehon pitämiseksi vakiona. Tämä menetelmä auttaa tasapainottamaan

latausenergiaa koko latausprosessin ajan ja on erityisen hyödyllinen silloin, kun akku halutaan ladata nopeasti tietylle jännitetasolle. Tällaisia kohteita ovat muun muassa sähköajoneuvot sekä tietyt teolliset akkujärjestelmät, joissa akun lataaminen nopeasti ja tehokkaasti on ratkaisevan tärkeää. (Castrejon Suarez del Real, 2024d)

Lataustavan huonona puolena on akun lämpeneminen. Suurempi alkuvirta voi tuottaa merkittävästi lämpöä, jolloin ylikuumenemisen estämiseksi tehokas lämmönhallinta on välttämätöntä. Lisäksi nopeat virranmuutokset saattavat rasittaa akkua vähentäen sen käyttöikää tai kapasiteettia. Huonona puolena on myös vakiojännite- tai vakiovirtalatausjärjestelmää monimutkaisempi latauspiiri. Näiden ohella lataustavan tehokkuus saattaa vaihdella akun tyyppin ja kunnon mukaan johtaen vähemmän optimaaliseen lataukseen. Esimerkiksi akuissa, joissa sisäinen resistanssi muuttuu merkittävästi lämpötilan tai varaustilan mukaan, vakiotehon ylläpitäminen on vähemmän tehokasta, eikä näin ollen saavuteta akun optimaalista latausta. (Castrejon Suarez del Real, 2024d)

## 5.5 Ylläpitolataus

Ylläpitolatausta käytetään tyypillisesti lähes täyteen tai täyteen ladattujen akkujen kohdalla kompensoimaan itsepurkautumista ja pitämään akku täysin ladattuna. Tässä latausmenetelmässä käytetään hyvin pientä virtaa. Ylläpitolataus sopii laitteille, jotka ovat valmiustilassa pitkiä aikoja, kuten hätävalot. (Castrejon Suarez del Real, 2024d)

Vaikka tämä latausmenetelmä auttaa pitämään akun lähes täydessä varauksessa ilman yllä latauksen riskiä, ei sitä suositella litiumioniakuille. Syynä tähän on niiden alttius ylilataukselle. Pitkittyneen ylläpitolatauksen seurauksena litiumioniakkujen toiminta heikkenee ja niiden elinikä lyhenee. (Castrejon Suarez del Real, 2024d)

## 5.6 Pulssilataus

Pulssilatausmenetelmässä lataussyklin aikana lähetetään virtapulsseja, joiden välissä on taukoja tai hyvin pieniä virtoja. Näiden pulssien voimakkuutta, kestoja ja väliä voidaan säätää akun tyyppin ja kunnon mukaan. Tämä menetelmä auttaa vähentämään lämmön kertymistä ja vakauttamaan akun sisäistä kemialla. (Castrejon Suarez del Real, 2024d)

Pulssilatauksen uskotaan parantavan lataustehoa ja pidentävän nikkelpohjaisten akkujen, kuten nikkelimetallihydridin (NiMH), käyttöikää. Latauksen periaate on ladata vuorottelemalla suuria virtoja ja lepojaksia. Tämä auttaa estämään pitkäaikaisen altistumisen suuralle virralle lieventäen muistivaikutuksia ja pidentäen akun käyttöikää. Lisäksi se parantaa

latauksen jakautumista akun sisällä. Lepojaksot sallivat akun sisäisten reaktioiden vakiintumisen, mikä estää paikallista ylikuumentumista. Myös litiumioniakut käyttävät pulssilatausta, koska se optimoi ionivirtausta mahdollistaen ionien tasaisemman jakautumisen. (Castrejon Suarez del Real, 2024d)

## 6. AKKUTYYPIT

Akut luokitellaan yleensä elektrodiensa materiaalin mukaan. Lyijyakku, nikkelimetallihydridiakku, nikkelikadmiumakku ja litiumioniakku ovat yleisimpiä akkutyypppejä. Erilaisilla akkutyypeillä on erilaisia suorituskykyominaisuuksia, joten ne sopivat erilaisiin sovelluksiin. Tärkeimpiä ominaisuuksia akuille ovat mm. energiakapasiteetti, kennojännite, käyttöikä, suorituskyky eri lämpötiloissa sekä kustannukset. (Motiva, 2024)

### 6.1 Lyijyakut

Lyijyakku on yksi vanhimmista ja yhä nykyäänkin yksi yleisimmistä akkutyypeistä. Lyijyakku koostuu lyijylevyistä, jotka on upotettu happamaan elektrolyyttiin, yleensä rikkihappoon. Lyijylevyt ovat pinottu ja kytketty sarjaan kennon muodostamiseksi. Positiiviset levyt valmistetaan yleensä lyijydioksidista ja negatiiviset huokoisesta lyijystä. Levyt erotetaan toisistaan eristemateriaalilla, kuten polyeteenillä. (Warner, 2015, s. 44)

Lyijyakut voidaan jakaa käynnistysakkuihin ja syväpurkausakkuihin. Syväpurkausakut ovat suunniteltu nimensä mukaisesti purkautumaan käyttäen suurimman osan niiden kapasiteetistaan. Käynnistysakut puolestaan tuottavat korkeaa virtaa lyhemmäksi ajaksi, ja niitä käytetään pienemmällä purkaussyvyydellä. (Castrejon Suarez del Real, 2024c)

Lyijyakkutyypppejä ovat:

- Avoimet lyijyhappoakut eli FLA-akut (engl. flooded lead-acid)
- Suljetut, venttiiliohjatut VRLA-akut (engl. valve regulated lead-acid), jotka luokitellaan
  - AGM-akkuihin (engl. absorbent glass mat)
  - Geeliakkuihin (hyttelöakkuihin)

Kaikkien lyijyakkujen toiminnan perustana on sama kemiallinen reaktio. Latauksen aikana akun lyijylevyillä oleva lyijysulfaatti ( $PbSO_4$ ) ja vedeksi muuttunut elektrolyytti muutetaan sähkövirran avulla takaisin alkuperäiseen muotoonsa. Negatiiviselle elektrodille muodostuu lyijyä ( $Pb$ ), positiiviselle elektrodille lyijydioksidia ( $PbO_2$ ) ja vedeksi hajonnut elektrolyytti palautuu rikkihapoksi ( $H_2SO_4$ ). (Yleiselektroniikka, 2024)

Avoimien ja suljettujen lyijyakkujen merkittävin ero liittyy rekombinaatioreaktioon. Koska latauksen loppuvaiheessa osa rikkihapossa olevasta vedystä ja hapesta eivät enää pysty si-

toutumaan vedeksi, nämä kaasut joko vapautuvat ulos akusta tai sitoutuvat takaisin kiertoon rekombinaatioreaktion ansiosta. Avoimissa lyijyakuissa ei rekombinaatiota tapahdu, eli vety ja happi vapautuvat, jolloin akkuihin on tarvittaessa lisättävä tislattua vettä ( $H_2O$ ). Suljetuissa lyijyakuissa kaasut eivät pääse ulos kotelosta, ja ne sitoutuvat takaisin kiertoon tehden akut huoltovapaiksi. (Yleiselektroniikka, 2024)

Warnerin (2015, s. 67–68) mukaan perinteisissä lyijyakuissa on kaasujen muodostumisen lisäksi haasteena aktiivisen materiaalin irtoaminen lyijylevyiltä. Lyijyakun levyjen aktiivinen materiaali, lyijy, imee rikkiä happamasta elektrolyytistä purkautumisen aikana. Latauksen aikana rikki palautuu takaisin elektrolyttiin. Ajan kuluessa tästä aiheutuu aktiivisen materiaalin irtoamista levyiltä ja sen kerääntymistä akun pohjalle, mikä rajoittaa perinteisten lyijyakkujen sykli-ikää. Tämän vuoksi useimmat lyijyakut ovat suunniteltu siten, että kennojen pohjalla on ylimääräistä tilaa irronneen materiaalin keräämiseksi, jotta voidaan estää oikosulun syntyminen. (Warner, 2015, s. 67–68)

Suljettujen lyijyakkujen elektrolyytti on imeytetty lasikuituerottimeen. AGM-akuissa lasikuituerottimena toimii lasikuitumatto ja geeliakuissa hyytelö. AGM-akkujen ja geeliakkujen rakenteet ovat samanlaiset lukuun ottamatta tätä väliainetta. Molemmat akkutyypit ovat huoltovapaita ja turvallisia käyttää, mutta käyttö- sekä latausominaisuuksiltaan ne eroavat hieman toisistaan. AGM-akut kestävät paremmin korkean virran latausta ja purkua, kun geeliakut tulee ladata matalammilla virroilla. Geeliakut kestävät kuitenkin syväpurkuja ja säilyttävät kapasiteettinsa paremmin pitkällä aikavälillä kuin AGM-akut. Taulukko 2 esittää suljettujen lyijyakkujen hyviä ja huonoja puolia avoimiin lyijyakkuihin verrattuna. (Dell & Rand, 2001, s. 120–124)

**Taulukko 2.** AGM- ja geelityyppisten akkujen edut ja huonot puolet suhteessa vastaaviin avoimiin akkuihin (mukailtu lähteestä Dell & Rand, 2001, s. 122).

Edut	Haitat
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ei veden lisäämistä</li> <li>• Ei happovuotoja</li> <li>• Vähäiset happohöyryt</li> <li>• Helppo kuljetus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vaatii tarkan latauksen</li> <li>• Lämmönhallinta kriittisempi</li> <li>• Merkittävää vaihtelua jännitteen arvossa täyteen ladattuna</li> <li>• Ylilatauksen tarve kasvaa korkeissa lämpötiloissa</li> </ul>

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ei erityisvaatimuksia ilmanvaihdolle</li> <li>• Toimii kaikissa asennoissa</li> <li>• Vähäisempi ylläpidon tarve huoneenlämmössä</li> <li>• Suuri purkauskyky (AGM-akku)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Käyttöikä lyhyempi, tyypillisesti 4 vuotta</li> </ul> |
|--|--|

Lyijyakkujen ominaisenergia on alhainen lyijyn painon vuoksi. Tyypillisesti arvo on n. 40 Wh/kg, kun se esimerkiksi litiumioniakuilla on 150 Wh/kg. Energiatiheys lyijyakuille on myös alhainen, n. 70 Wh/l. Vastaava arvo litiumioniakuille on 500 Wh/l. Taulukko 3 havainnollistaa lyijyakuille tyypillisiä ominaisuuksia. AGM-akkujen hintataso tällä hetkellä on n. 190 €/kWh. (Rantakokko, 2024)

**Taulukko 3.** Lyijyakkujen tyypilliset ominaisuudet (Warner, 2015, s. 67).

Lead Acid	
Chemistry descriptor	PbA/LAB
Specific energy (Wh/kg)	30–40
Energy density (Wh/L)	60–70
Specific power (W/kg)	60–180
Power density (W/L)	100
Nominal voltage (per cell) (V)	2.0
Cycle life	300–800
Self-discharge (% per month)	3–5%
Operating temperature range (°C)	-20 to +60
Cost (per kWh)	\$150–\$200
Maintenance	3–6 months

## 6.2 Nikkelipohjaiset akut

Nikkelikadmium, nikkelimetallihydridi ja nikkelisinkki ovat yleisimpiä nikkelipohjaisia akkuja. Näiden akkujärjestelmien kehittyminen oli seurausta lyijyakkujen keksimiselle tarjoten korkeamman jännitteen, suuremman kapasiteetin sekä enemmän syklejä perinteisiin

lyijyakkuihin verrattuna. Taulukko 4 havainnollistaa nikkelpohjaisten akkujen ominaisuuksia. Haasteina nikkelpohjaisilla akuilla ovat muun muassa korkea itsepurkautuminen sekä ilmiö, joka tunnetaan nimellä muisti-ilmiö. Se on seurausta akkujen purkamisesta samaan tilaan toistuvasti, jolloin akut näyttävät ”muistavan” edellisen toimitetun energiamäärän rajoittaen akkujen käytettävissä olevaa kapasiteetin määrää. Näiden akkutyypin muistivaikutusta voidaan jonkin verran minimoida suorittamalla säännöllisiä täyden kapasiteetin purkauksia. (Castrejon Suarez del Real, 2024c; Warner, 2015, s. 72)

### 6.2.1 Nikkelikadmiumakut (NiCd)

Nikkelikadmiumakkuja on käytetty pitkään teollisuudessa ja kuluttajaelektronikassa niiden kestävyden ja luotettavuuden ansiosta. Ne koostuvat nikkelistä ja kadmiumista sekä elektrolyytinä käytettävästä kaliumhydroksidista. Niiden suorituskyky korkean virran ja matalien lämpötilojen osalta on parempi kuin lyijyakkujen. Muita ominaisuuksia NiCd-akuissa ovat tasainen purkausjännite, jatkuva ylläpidon sietokyky, vähäinen huoltotarve ja erinomainen luotettavuus. (Boddula ym., 2020, s. 44)

Linja-Ahon (2022, s. 18) mukaan nikkelikadmiumakut olivat yleisesti käytössä kuluttajaelektronikan ladattavissa akuissa aina 1990-luvun alkupuolelle asti, kunnes nikkelimetallihydridi- ja litiumioniakut syrjäyttivät ne. Hän mainitsee viimeisen naulan nikkelikadmiumakkujen arkkuun kuluttajakäytössä olleen RoHS-direktiivi 2000-luvun alussa. Tämä EU-direktiivi asetti tiukat vaatimukset terveydelle haitallisten aineiden käytöstä kuluttajaelektronikassa. EU-alueella nikkelikadmiumakkuja on nykyisin käytössä enää joissain erikoissovelluksissa, kuten lentokoneiden akkujärjestelmissä, mutta EU:n ulkopuolella ne ovat edelleen maailmanlaajuisessa käytössä. (Linja-Aho, 2022, s. 18; Warner, 2015, s. 72–73)

### 6.2.2 Nikkelimetallihydridiakut (NiMH)

Nikkelimetallihydridiakkuja (NiMH) pidetään kohtuuhintaisina ja kestävinä. Ne tarjoavat pidemmän käyttöiän ja suuremman kapasiteetin kuin NiCd-akut, ja sijoittuvat kustannuksiltaan lyijyakkujen ja litiumioniakkujen väliin. Osassa alan kirjallisuudessa (Bertuol ym., 2006; Castrejon Suarez del Real, 2024c; Zhan ym., 1999) on esitetty, että NiMH-akuissa ei NiCd-akkujen tapaan ole muistivaikutusta. Eräät aihetta tutkineet (Buchmann, 2021b; Karsten ym., 2007; Watanabe ym., 2012) kuitenkin raportoivat, että muistivaikutusta esiintyy myös NiMH-akuissa, mutta NiCd-akut ovat herkempiä kyseiselle ilmiölle. (Linden & Reddy, 2011, s. 680)

**Taulukko 4.** Nikkelipohjaisten akkujen ominaisuuksia (Warner, 2015, s. 72).

	Nickel Metal Hydride	Nickel Cadmium	Nickel Zinc
Chemistry descriptor	NiMh	NiCd	NiZn
Specific energy (Wh/kg)	30–80	40–60	70–110
Energy density (Wh/L)	140–300	50–150	130–350
Specific power (W/kg)	250–1000	150	280–2500
Power density (W/L)	400	210	420–7000
Nominal voltage (per cell) (V)	1.2	1.2	1.6
Cycle life	500–1500	1000–2000	300–900
Self-discharge (% per month)	30%	20%	20%
Operating temperature range (°C)	-20 to +60	-40 to +60	-20 to +50

### 6.3 Litiumioniakut

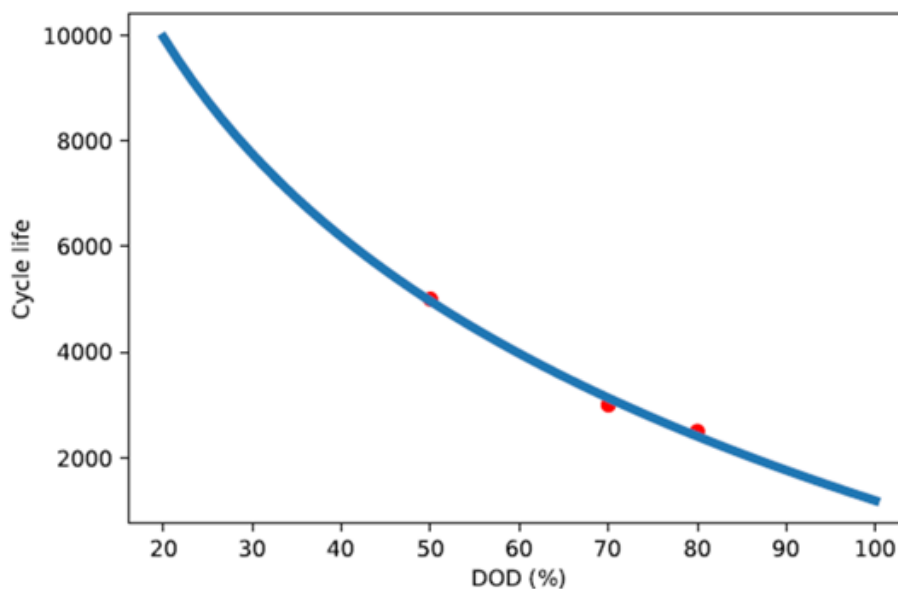
Litiumioniakut kaupallistettiin ensimmäisen kerran 1990-luvulla grafiittipohjaisella anodilla. Muihin akkutyyppeihin verrattuna litiumioniakuilla on korkeampi ominaisenergia ja energiatiheys, parempi syklikesto, laaja käyttölämpötila-alue ja alhainen itsepurkautumisnopeus. Litiumionikemien nimellisjännite on suuruudeltaan n. 3,7 V riippuen akun elektrodien aktiiviaineista. (Castrejon Suarez del Real, 2024c; Linja-Aho, 2022, s. 19)

Nykyaikaisissa litiumionikemien katodi koostuu virrankerääjänä toimivasta alumiinikalvosta sekä aktiiviaineesta, joka on litiumyhdiste. Tämän litiumyhdisteen mukaan kyseinen akkukemnotyyppi nimetään. Esimerkiksi katodin aktiivimateriaalin ollessa litiumrauta-fosfaattia, kemnoa kutsutaan LFP-kemnoksi. Anodi puolestaan koostuu kuparilevystä ja aktiivimateriaalina toimivasta grafiitista. Litiumtitanaattiakku ja litiumpolymeeriakku muodostavat poikkeuksen nimeämiskäytäntöön. Litiumpolymeeriakkuksi kutsutaan litiumioniakkuja, jossa elektrolyytti on nesteen sijasta geelimäistä polymeeriä. Litiumtitanaattiakussa anodin aktiivimateriaalina toimii litiumtitanaatti ja katodimateriaali voi olla esimerkiksi litiummangaanioksidia (LMO), litiumrauta-fosfaattia (LFP) tai jotain muuta katodimateriaalia. Jokainen näistä katodimateriaaleista tarjoaa yksilöllisiä etuja muun muassa energiatheyden, turvallisuuden ja käyttöiän suhteen. Eri litiumioniakkujen ominaisuuksia on havainnollistettu alla olevassa taulukossa 5. (Linja-Aho, 2022, s. 28; Nemeth ym., 2020)

**Taulukko 5.** Litiukioniakkujen ominaisuuksia (Warner, 2015, s. 77).

	Lithium Iron Phosphate	Lithium Manganese Oxide	Lithium Titanate	Lithium Cobalt Oxide	Lithium Nickel Cobalt Aluminum	Lithium Nickel Manganese Cobalt
Cathode chemistry descriptor	LFP	LMO	LTO	LCO	NCA	NMC
Specific energy (Wh/kg)	80–130	105–120	70	120–150	80–220	140–180
Energy density (Wh/L)	220–250	250–265	130	250–450	210–600	325
Specific power (W/kg)	1400–2400	1000	750	600	1500–1900	500–3000
Power density (W/L)	4500	2000	1400	1200–3000	4000–5000	6500
Volts (per cell) (V)	3.2–3.3	3.8	2.2–2.3	3.6–3.8	3.6	3.6–3.7
Cycle life	1000–2000	>500	>4000	>700	>1000	1000–4000
Self-discharge (% per month)	<1%	5%	2–10%	1–5%	2–10%	1%
Cost (per kWh)	\$400–\$1200	\$400–\$900	\$600–\$2000	\$250–\$450	\$600–\$1000	\$500–\$900
Operating temperature range (°C)	-20 to +60	-20 to +60	-40 to +55	-20 to +60	-20 to +60	-20 to +55

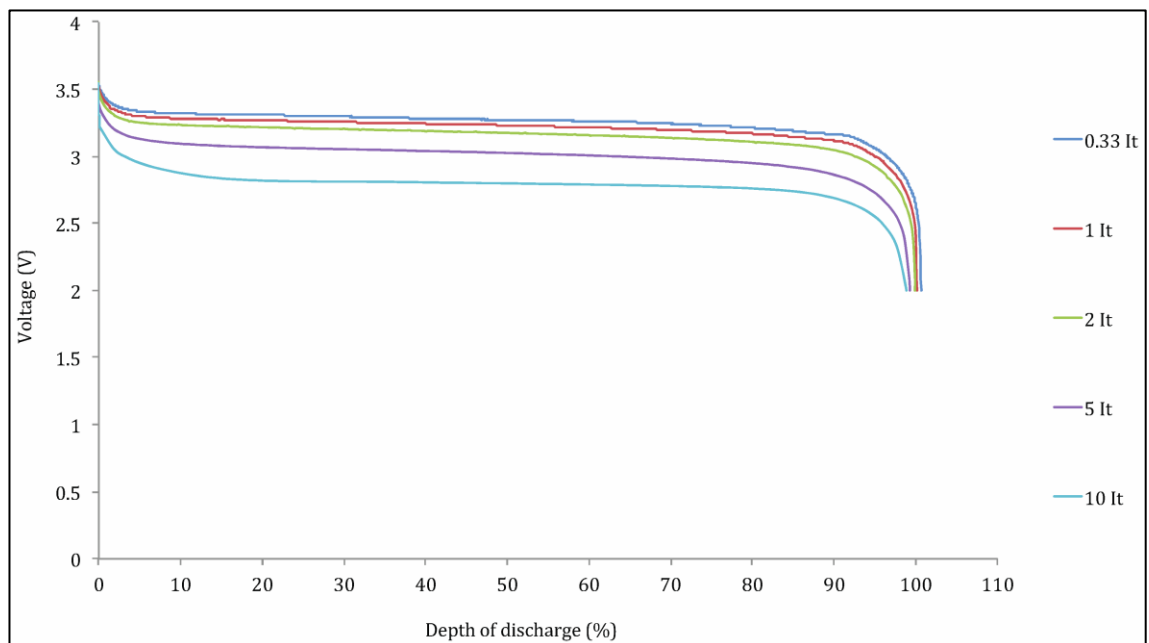
Litiumionikemien tyypillinen syklikesto purkaussyvyyden funktiona on esitetty alla olevassa kuvassa 18. Syklikestoon vaikuttaa purkaussyvyyden lisäksi monet muut tekijät. Näitä on käsitelty aiemmin luvussa 4.5.

**Kuva 18.** Erään litiumioniakun purkaussyvyyden vaikutus syklikestoon (mukailtu lähteestä Zia ym., 2019).

Litiumionikemien valmistaminen on rullalta rullalle -prosessi. Linja-aho (2022, s. 28–29), vertaa litiumionikemien valmistamista paperin valmistamiseen. Hän huomauttaa, että samoin kuin paperin, myös litiumionikemien valmistaminen vaatii suuret ja kalliit koneet sekä paljon energiaa. Suurilla tuotantomäärillä saavutetaan skaalaetuja hinnassa. Se, kuinka suuret kasvihuonepäästöt litiumioniakkujen valmistuksessa syntyvät, riippuu valmistuksessa käytetyn sähkön tuotantotavasta. Vuonna 2018 julkaistussa ICCT:n (engl. The International Council On Clean Transportation) raportissa on esitetty eri tutkimuksissa lasketuja arvioita ajoneuvoakkujen valmistuksen hiilijalanjäljelle. Arvot vaihtelevat välillä 30–494 kg/kWh. Vähäpäästöisillä menetelmillä tuotetun sähkön tapauksissa päästään alle 50 kg/kWh:n lukemaan. (Hall & Lutsey, 2018; Linja-Aho, 2022, s. 131–132)

### 6.3.1 Litiumrautafosfaatti (LFP)

Litiumrautafosfaattikemien katodimateriaali on litiumrautafosfaattia ( $LiFePO_4$ ). Koska kemioissa käytetään kalliiden harvinaisten metallien sijasta maapallolla runsaasti esiintyvää rautaa ja fosfaattia, erottuvat LFP-kemiot edukseen hintansa puolesta. LFP-kemien nimellisjännite on 3,25 V, joka on alhaisempi kuin kobolttipohjaisilla akkukemioilla. Lisäksi niillä on alhaisempi ominaisenergia. LFP-kemien yksi merkittävä ominaisuus on niiden kemiojännitteen muuttuminen hyvin vähän purkamisen aikana. Tätä on havainnollistettu kuvassa 19. Ominaisuus on toisaalta hyödyksi, mutta toisaalta kemien tasapainottaminen on haastavampaa. (Bhutada, 2023; Linja-Aho, 2022, s. 30–31)



**Kuva 19.** LFP-kemion jännitteen muutos eri C-arvoilla (mukailtu lähteestä Omar ym., 2013).

### 6.3.2 Litiumkobolttioksidi (LCO)

Litiumkobolttioksidi ( $LiCoO_2$ ) on vanhin litiumioniakkutekniikka, jota käytettiin jo 1990-luvulla mm. matkapuhelinten akkuna. LCO:n merkittävimpiä puutteita ovat stabiilius sekä varsin huono ominaisteho. Myös koboltin runsas määrä on ongelma, koska se nostaa kennotyyppin hintaa. LCO on kuitenkin edelleen suosittu akkukemia kevyissä sovelluksissa, joissa tarvitaan suhteellisen pientä tehoa pitkiä aikoja. (Bhutada, 2023; Linja-Aho, 2022, s. 32–33)

### 6.3.3 Litiumnikkelioksidi (LNO)

LNO-kennojen energiatiheys on LCO-kennoja suurempi, mutta turvallisuus ja syklikesto hieman heikompi. LNO-kennot ovat erittäin harvinaisia, mutta ainakaan tutkimuskohteena sitä ei ole kokonaan hylätty. Esimerkiksi Schweidler ym. (2020) pitävät litiumnikkelioksidia houkuttelevana materiaalina seuraavan sukupolven litiumioniakuissa sen suuren teoreettisen ominaiskapasiteettinsa ansiosta. (Linja-Aho, 2022, s. 33)

### 6.3.4 Nikkelimangaanikoboltti (NMC)

NMC-katodit sisältävät tyypillisesti runsaasti nikkeliä, mikä lisää akun energiatheyttä. Energiatiheyden ohella hyvä virranantokyky on NMC-kennojen etu. Korkea nikkeliipitoisuus voi kuitenkin tehdä akusta epävakaa, jolloin mangaania ja kobolttia käytetään parantamaan lämpöstabiiliutta ja turvallisuutta. NMC-kennoilla ei ole yksittäistä selvää heikkoutta. (Bhutada, 2023; Linja-Aho, 2022, s. 34)

### 6.3.5 Nikkelikobolttialumiini (NCA)

Litiumnikkelikobolttialumiinikennot ( $LiNiCoAlO_2$ ), lyhyemmin NCA-kennot jakavat NMC-kennojen kanssa nikkeliin perustuvat edut, kuten korkean energiatheyden ja erinomaisen tehon. Mangaanin sijaan NCA-kennoissa käytetään alumiinia vakauden lisäämiseksi. NCA-kennot ovat kalliita, ja tyypillisesti käytössä vain korkean suorituskyvyn sähköajoneuvoissa. Esimerkiksi Tesla on käyttänyt NCA-kennoja pitkään. Heikkouksia NCA-kennoilla ovat kapasiteetin heikkeneminen korkeissa lämpötiloissa, huonohko syklikestävyys sekä lämpöryntäysalttius. (Bhutada, 2023; Linja-Aho, 2022, s. 33)

### 6.3.6 Litiummangaanioksidi (LMO)

Litiummangaanioksidi on edullinen, hyvän ominaisenergian omaava akkukemia. LMO-kennoinen akku tunnetaan myös nimellä mangaanispinelliakku. Huono puoli kyseisellä akkukemialla on matala syklikesto. LMO-kennoja käytetään esimerkiksi käsityökaluissa sen matalan sisäisen resistanssin vuoksi. Usein LMO:ta käytetään yhdessä muiden akkukemioiden kanssa pienentämään sisäistä resistanssia. (Bhutada, 2023; Linja-Aho, 2022, s. 33)

### 6.3.7 Litiumtitanaatti (LTO)

Litiumtitanaatti-kennoissa anodi on valmistettu litiumtitanaatista ( $Li_4Ti_5O_{12}$ ), kun muissa kaupallisissa litiumionikennoissa anodi on tyypillisesti grafiittia. Katodin tarkka materiaali vaihtelee käyttökohteen ja valmistajan mukaan, mutta yleisesti ottaen LTO-kennot hyödynävät samoja katodimateriaaleja kuin muutkin litiumioniakut. Esimerkiksi NMC ja LFP ovat usein LTO-kennojen katodeissa käytettyjä metallioksidgeja. (Miao ym., 2019)

LTO-kennojen etuja ovat suuri virrankesto, joka perustuu litiumtitanaattikiteiden grafiittia suurempaan anodipinta-alaan. Muita etuja LTO-kennoilla ovat erinomainen syklikesto sekä turvallisuus. Huonoja puolia ovat matala kennojännite, korkea hinta, huono ominaisenergia ja energiatiheys. Matalan kennojännitteen seurauksena kennoja pitää kytkeä sarjaan enemmän kuin muilla akkukemioilla riittävän suuren jännitteen saavuttamiseksi. Tämä lisää kokoonpanokustannuksia. Käyttökohteita LTO-kennoille ovat sovellukset, joissa koko ja paino eivät ole kriittinen tekijä, mutta suuri lataus- ja purkausnopeus ovat. (Linja-Aho, 2022, s. 34–35)

### 6.3.8 Litiumpolymeeri (LiPo)

Litiumpolymeerikenno on litiumionikenno, jossa elektrolyytti on nesteen sijasta geelimäistä polymeeria. Anodi- ja katodimateriaalit ovat usein samoja kuin muissa litiumionikennoissa, esim. grafiittia ja litiumrautafosfaattia. Polymeerielektrolyytin etu on sen hyvä stabiilius korkeissa lämpötiloissa. Näin ollen se on usein turvallinen vaihtoehto sovelluksiin, joissa akkua puretaan ja ladataan erittäin suurilla virroilla. Muita etuja LiPo-kennoilla on niiden rakenteen mahdollistama helppo muokattavuus sekä keveys. Näistä syistä niitä käytetään laajalti esim. droneissa ja kannettavissa laitteissa. Haittapuolena muihin litiumioniakkuihin verrattuna LiPo-akuilla on herkempi rakenne ja lyhyempi käyttöikä. (Awati, 2024; Linja-Aho, 2022, s. 35)

## 6.4 Uudet akkutyypit

Warnerin (2015, s. 214) mukaan perinteisessä litiumioniakussa on kolme eri osaa, joita kehitetään jatkuvasti: anodi, katodi ja elektrolyytit. Työskentelemällä näiden kolmen komponentin kanssa tutkijat pyrkivät nostamaan litiumiokennojen käyttöjännitettä, lisäämään energiatiheyttä ja parantamaan kennojen turvallisuutta sekä käyttöikää. Kiinteän elektrolyytin akut (engl. solid state batteries) ovat esimerkki elektrolyytin kehitystyöstä, ja ne ovat tekemässä tuloaan markkinoille. (Jalovaara, 2023)

Litiumiin pohjautuvien akkujen kehitystyön ohella pyritään etsimään korvaavaa vaihtoehtoa kyseiselle materiaalille. Natriumioniakut ovat tulevaisuudessa mahdollinen haastaja litiumioniakuille. Niiden suuri etu on natriumin runsas esiintyminen maaperässä. (Abraham, 2020)

## 7. AKUSTON VALVONTA JA HALLINTA

Akunhallinta tarkoittaa akun toimintojen seuranta ja hallintaa sen varmistamiseksi, että akkua käytetään turvallisesti akun ominaisuuksien asettamien rajoitusten mukaisesti. Täysin varusteltu akunhallintajärjestelmä (BMS, battery management system) osallistuu akun valvontaan, lataamiseen, lämpötilan valvontaan ja turvallisuuteen liittyviin prosesseihin. Hallintajärjestelmä koostuu näin ollen useista alijärjestelmistä. Tässä luvussa käsitellään yleisimpien alijärjestelmien lisäksi itse akunhallintajärjestelmää ja sen rakennetta. Andrea (2020, s. 211) huomauttaa, että jokainen litiumioniakku tarvitsee aina akunhallintajärjestelmän, sillä litiumionikennot ovat erityisen herkkiä ja väärinkäytettyinä aiheuttavat tulipalon ja räjähdysvaaran. Vaikka akunhallintajärjestelmä kuuluu olennaisena osana litiumioniakkuosovellukseen, myös luonnostaan vakaammat akkutyypit hyötyvät akunhallintajärjestelmästä. Esimerkiksi lyijyakkujen turvallisuutta, tehokkuutta ja käyttöikää voidaan parantaa akunhallintajärjestelmän avulla. (Castrejon Suarez del Real, 2024e; P. Wang & Zhu, 2020)

### 7.1 Jännitteen seuranta

Akun jännitteen seuranta on keskeinen osa BMS-järjestelmää erityisesti litiumionikenttien tapauksessa. Litiumioniakuissa käytetään kahta eri jännitteenmittausta. Jokaisen yksittäisen kennon jännitteen lisäksi mitataan koko akkupaketin lähtöjännitettä. Käytön aikana jokaisen kennon on pysyttävä sallitun kennojännitealueen sisällä, joka vaihtelee akun kemiallisen koostumuksen mukaan. Esimerkiksi litiumrautafosfaattipitoisilla akuilla tyyppillinen turvallinen OCV-alue on 2,8–3,65 V. Yksikään kenno ei saisi olla sallitun OCV-alueen ulkopuolella pitkiä aikoja vaurioitumisen välttämiseksi. Akun käytön aikana lyhytkestoinen ylitus tai alitus voi olla sallittua sovelluksesta ja akkutyypistä riippuen. (Andrea, 2020, s. 239–240; Castrejon Suarez del Real, 2024e)

Koko akkupaketin jännitteen mittaamisella varmistetaan, ettei yksittäisistä kennoista mitattujen jännitteiden summa poikkea akkupaketin kokonaislähtöjännitteestä. Mikäli jännitteissä on eroa, se viittaa vian esiintymiseen mittauspiirissä tai akuston ja kuorman välisessä yhteydessä. Tämä saattaa aiheuttaa akuston vikaantumisen. (Castrejon Suarez del Real, 2024e)

Tyypillisessä akunvalvontapiirissä kennojen jännitteet mitataan yksittäisten kennojen väliltä. Mittauksissa käytetään analogia-digitaalimuuntimia (A/D-muuntimia) muuntamaan

mitatut jännitteet BMS:n käsittelemään digitaaliseen muotoon. Sama johdotus voi myös toimia jännitteiden tasaamiseen latauksen aikana. (Andrea, 2020, s. 239–240)

## 7.2 Virran seuranta

Akun virtamittauksen avulla varmistetaan, että akun valmistajan asettamia virtarajoja ei ylitetä. Virran mittaus voidaan toteuttaa shunttivastuksen tai Hall-anturin avulla. Mittauksesta saatu jännitearvo muutetaan A/D-muuntimella BMS:n käsittelemään digitaaliseen muotoon, jonka jälkeen tietoa käytetään esimerkiksi akun varaustilan (SoC) laskemiseen tai ylisuuresta virrasta varoittamiseen. (Castrejon Suarez del Real, 2024e)

## 7.3 Lämpötilan seuranta

Lämpötilamittaukset akuille toteutetaan yleensä PTC- tai NTC-sensoreilla, joissa resistanssi muuttuu lämpötilan mukaan. A/D-muunninta käytetään lämpötilaa vastaavan jännitteen muuntamiseksi digitaaliseen muotoon. Akun hallintajärjestelmässä tarvitaan akun sisäinen ja ulkoinen lämpötilamittaus, jotta voidaan valvoa kennojen ja ympäristön lämpötiloja. Suuremmissa järjestelmissä voidaan tarvita useampia lämpötilasensoreita. (Castrejon Suarez del Real, 2024e)

## 7.4 Kennojen tasapainotus

Yksi BMS-järjestelmän ominaisuuksista on kyky pitää akun kennot samassa varaustilassa. Tätä kutsutaan kennojen tasapainottamiseksi. Syynä kennojen tasapainottamiselle on kennojen varaustilojen ajautuminen erilleen. Heikoin kenno määrää koko kennoryhmän kapasiteetin, koska kennon purkaminen on lopetettava kennon vaurioitumisen välttämiseksi. Tämä estää muiden kennojen täysimääräisen hyödyntämisen ja näin akun kokonaiskapasiteetti heikkenee. (Warner, 2015, s. 95)

Kennojen tasapainottamiseen on kaksi päämenetelmää: aktiivinen ja passiivinen tasapainotus. Ero menetelmien välillä perustuu siihen, mitä kennon ylimääräiselle energialle tehdään. Seuraavassa on kuvattuna näiden menetelmien periaatteita (Warner, 2015, s. 95–98):

Passiivinen tasapainotus:

- Ylimääräinen energia korkeimman varaustilan (SOC) kennoista hukataan lämpöenergiana.
- Muunto lämpöenergiaksi tapahtuu kennon rinnalle kytkettävien vastusten kautta.

- Vastuksia ohjataan ohjauskytkimillä, joita BMS ohjaa. BMS valvoo kunkin kennon jännitettä ja säätää aikaa, jonka vastukset pysyvät kytkettyinä.
- Tämä tasapainotusmenetelmä on edullinen, mutta vaatii riittävän lämmönhallinnan vastuksien aiheuttaman lämpömäärän vuoksi.

Aktiivinen tasapainotus:

- Ylimääräinen energia korkeammalla varaustilalla olevista kennoista siirretään matalammalla varaustilalla oleviin kennoihin
- Etuna on, että ylimääräistä energiaa ei hukata, vaan se siirretään muihin kennoihin
- Toteutus voidaan tehdä esim. kondensaattorien, kelojen tai DC-DC-muuntimien avulla
- Haittapuolena tasapainotusjärjestelmän kalliimmat kustannukset sekä tilantarve

Warner toteaa (2015, s. 99), että molempia järjestelmiä on arvioitu paljon viime vuosina. Hän kertoo, etteivät aktiivisen tasapainotusmenetelmän lisäkustannukset kata saavutettuja järjestelmähyötyjä. Tutkimuksessaan Khan ym. (2024) päätyvät samaan tulokseen.

## 7.5 Lämmönhallinta

Akkuja käytetään laajalti erilaisissa sovelluksissa, ja kasvava tarve lisätä akkujen energiakapasiteettia ja ladata akkuja suuremmilla virroilla johtaa lämmöntuotannon lisääntymiseen. Erityisesti suuritehoisissa lataus- ja purkusovelluksissa akkuun syntyy merkittävää lämpöä, joka on poistettava akun suorituskyvyn ylläpitämiseksi. Akkujen lämmönhallintajärjestelmät ovat olennaisia turvallisen toiminnan varmistamiseksi ja ne vastaavat tehokkaan jäähdytyksen ohella akkukennojen lämmityksestä, jotta toimintalämpötila pysyy halutulla alueella. (Rosen & Farsi, 2023, s. 119)

Esimerkiksi litiumioniakuille optimaalinen lämpötila-alue on 25–40 °C. Jos lämpötila nousee yli 40 °C, akun kapasiteetti ja syklikesto heikkenevät huomattavasti. Korkeat lämpötilat lisäävät kiinteän elektrolyyttirajapinnan kerrostumista ja sisäistä resistanssia, mikä vähentää akusta saatavaa tehoa. Äärimmäisissä olosuhteissa erotin voi sulaa ja aiheuttaa oikosulun, mikä voi johtaa akun lämpöryntäykseen (engl. thermal runaway). Alle 0 °C lämpötiloissa kapasiteetti heikkenee ja latauksessa voi tapahtua litiumin pinnoittumista. (Saw ym., 2015)

Akkujen lämmönhallintajärjestelmät (BTMS, engl. battery thermal management system) voidaan luokitella aktiivisiin, passiivisiin ja hybridijärjestelmiin. Aktiiviset lämmönhallintajärjestelmät käyttävät ulkoista energianlähdettä lämpötilan pitämiseksi halutulla alueella.

Yleisimmät aktiiviset jäähdytysmenetelmät ovat ilma-, neste-, ja kylmäainejäähdytys. Nestejäähdytysjärjestelmän etuna on mahdollisuus käyttää nestettä myös akun lämmitykseen kylmissä olosuhteissa. Muita aktiivisia lämmitysmenetelmiä ovat sähkövastusten avulla tapahtuva lämmitys sekä puhaltimien avulla toteutettava lämpimän ilman kierrätys. (Warner, 2015, s. 123–127)

Passiiviset lämmönhallintajärjestelmät hyödyntävät luonnollista lämmönsiirtoa, kuten lämmönjohtavuutta ja konvektiota. Ne ovat yksinkertaisia ja luotettavia, mutta eivät yhtä tehokkaita suurten lämpömäärien käsittelyssä kuin aktiiviset järjestelmät. Yksi esimerkki passiivisesta jäähdytyksestä on faasimuutosmateriaalin (PCM, engl. phase change material) avulla toteutettu ratkaisu, jossa materiaali absorboi lämmön ja jakaa sen tasaisesti materiaalin sisällä. Akun hukkalämmön hyödyntäminen akun lämpimänä pitämiseen on passiivista lämmitystä. (Warner, 2015, s. 127–129)

Hybridijärjestelmät yhdistävät aktiivisen ja passiivisen järjestelmän elementtejä. Esimerkiksi nestejäähdytysjärjestelmä voidaan yhdistää PCM-materiaaliin. PCM absorboi äkillisiä lämpöpiikkejä, ja nestejäähdytys poistaa jatkuvan lämpökuorman. Joissakin hybridijärjestelmissä lämmityselementit yhdistetään jäähdytysjärjestelmään. Tämä mahdollistaa sen, että akkua voidaan sekä jäähdyttää että lämmittää riippuen ympäristön lämpötilasta ja käyttöolosuhteista. Hybridijärjestelmä on erityisen hyödyllinen, kun akuston täytyy toimia hyvin laajalla lämpötila-alueella. (Zhao ym., 2020)

Eräs tehokas lämmönhallintajärjestelmä on akkujen upottaminen nesteeseen. Esimerkiksi Avant Oy käyttää tätä menetelmää sähkökuormaajensa akkujen toiminnan optimoimiseen. Lämpöä johtava neste auttaa säilyttämään akun tasaisen lämpötilan ja estää yksittäisten kennosolujen ylikuumentumisen. Järjestelmä on kehitetty erityisesti takaamaan turvallinen ja luotettava toiminta sekä kuumissa että kylmissä olosuhteissa, sillä sen avulla voidaan automaattisesti esilämmittää akut ennen käyttöä kylmällä säällä. Järjestelmä mahdollistaa myös nopeat latausajat. ("Avant Power leaps to the forefront of innovative battery technology", 2022, s. 10–11)

## 7.6 Varaustilan ja kuntotason arviointi

Akun varaustilan arviointi (SoC) on keskeinen osa akun hallintajärjestelmää (BMS). SoC kertoo, kuinka paljon energiaa akussa on jäljellä verrattuna täyden akun kapasiteettiin. SoC-arviointi voidaan suorittaa useilla eri menetelmillä, joista yksinkertaisin tapa on mitata akkujännite. Lyijyakuille tämä menetelmä on erityisen tehokas, mutta litiumioniakkujen kohdalla se ei ole yhtä tarkka, koska niiden jännite ei muutu lineaarisesti varaustilan mukaan. Kehittyneemmissä järjestelmissä käytetään akun kemiallisiin ja sähköisiin ominaisuuksiin

perustuvia malleja sekä erilaisia tekoälyn sovelluksia, jotka arvioivat akun varaustilan huomioiden suuria määriä erilaisia muuttujia. (A Guide to Understanding Battery Specifications, 2024; Castrejon Suarez del Real, 2024e)

Yksinkertainen tapa mitata SoC-arvoa on Coulomb-laskenta. Tämä menetelmä perustuu akun käytön aikana kulutetun sähkövarauksen seuraamiseen ja sen vertaamiseen viimeisimmän lataussyklin aikana vastaanotettuun varaukseen. Tämä tekniikka ei kuitenkaan huomioi purkauksen aikana syntyviä häviöitä eikä kapasiteetin vaihteluita, joita muuttuvat lämpötilat ja purkausnopeudet aiheuttavat. (Castrejon Suarez del Real, 2024b)

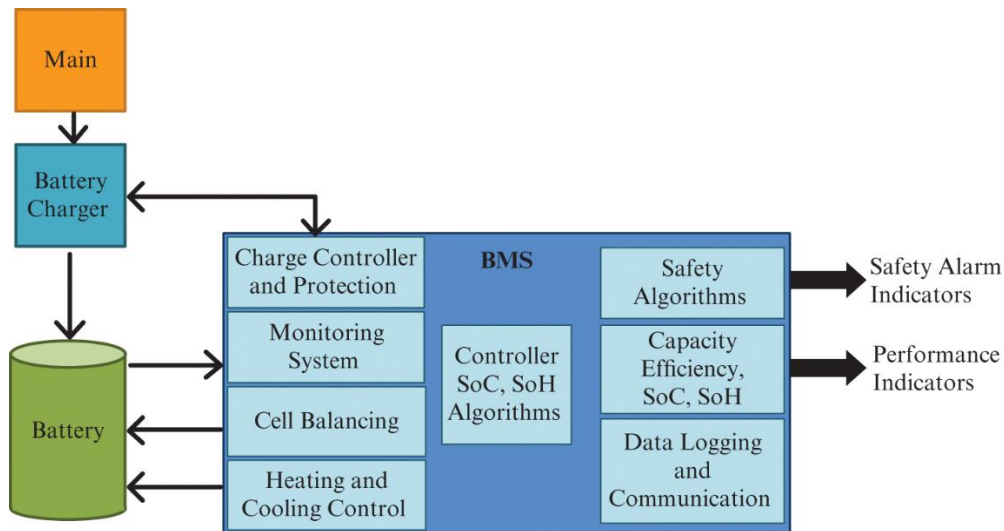
Vaihtoehtoinen menetelmä SoC:n määrittämiseksi on akun avoimen piirin jännitteen vertaaminen ennalta määritettyyn latauskäyrään. Erityisesti litiumioniakuilla on latauskäyrä, joka pysyy suhteellisen lineaarisena keskialueella poiketen merkittävästi ainoastaan ääri-laidoilla. Tämä menetelmä tarjoaa melko tarkan arvion SoC-arvosta litiumioniakuille, mutta arvioitu tarkkuus heikkenee akun ikääntyessä. Lisäksi lämpötila aiheuttaa lataustilan arvioinnin epätarkkuutta. Joissakin tapauksissa käytetään tarkkuuden parantamiseksi jännitteen vertaamista ja Coulomb-laskentaa yhdessä. (Castrejon Suarez del Real, 2024b)

Akun kuntotason (SoH) arviointi on myös tärkeä osa akun hallintajärjestelmää. Se antaa tietoa akun käytettävissä olevasta maksimikapasiteetista ja siitä, kuinka hyvin akku toimii. SoH-arviointimenetelmät voivat perustua esimerkiksi sisäisen vastuksen mittaamiseen tai kehittyneemmissä järjestelmissä malleihin ja algoritmeihin, jotka hyödyntävät akusta mitattavia suureita. Akun kuntotason heiketessä BMS voi säätää akun käyttöparametreja, kuten latausvirtaa, pidentääkseen akun käyttöikä. (Castrejon Suarez del Real, 2024b, 2024e)

## 7.7 BMS, toiminta ja rakenne

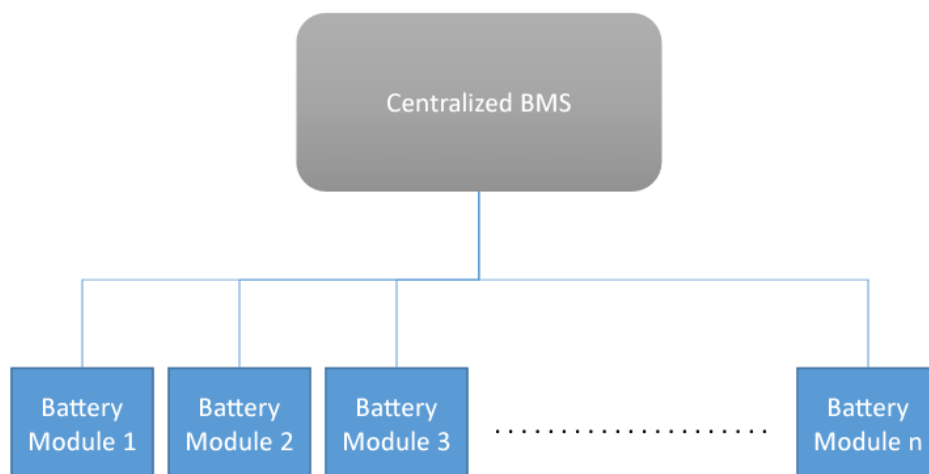
Akunhallintajärjestelmän (BMS) tärkein tehtävä on varmistaa akun turvallinen ja tehokas käyttö. Tämä tapahtuu seuraamalla ja hallinnoimalla luvussa aikaisemmin esiteltyjä parametreja. Yksinkertaisimmillaan akunhallinta on toteutettu elektronisella piirillä, joka estää kennojen liiallisen purkamisen tai ylilataamisen. Tällainen suojapiiri (PCM, engl. protection circuit module) on täysin analoginen, eikä sitä tyypillisesti kutsuta akunhallintajärjestelmäksi. PCM on edullinen ratkaisu yksinkertaisiin sovelluksiin, mutta suurikapasiteettisiin järjestelmiin vaaditaan kehittyneempi digitaalinen BMS. Digitaalisen BMS:n avulla kennojen yksityiskohtaisempi suojaus ja valvonta sekä tasapainotus on mahdollista. Lisäksi siinä on tiedonsiirtoväylä, joka mahdollistaa kommunikoinnin järjestelmän muiden laitteiden kanssa. BMS:n yleispiirteinen toiminta on esitetty kuvassa 20. Akkulaturi lataa akkua sähköverkosta, ja BMS ohjaa ja valvoo kennojen tasapainottamista, lämpötilaa sekä jännitteitä

ja virtaa. BMS jakaa tietoa järjestelmän muille laitteille muun muassa akun varaustilasta esimerkiksi CAN-väylän kautta. (Andrea, 2020, s. 211–212; Linja-Aho, 2022, s. 62; Tan ym., 2022)



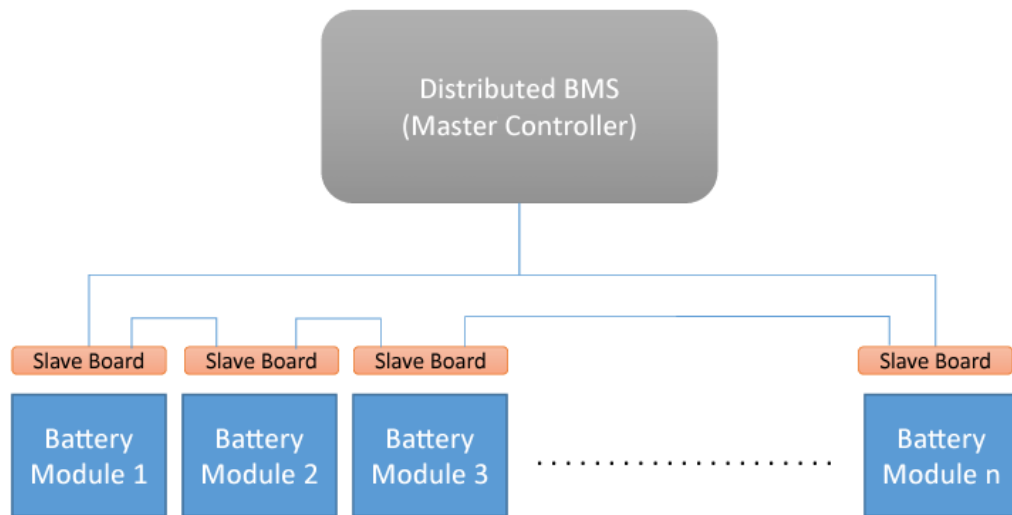
**Kuva 20.** BMS:n toiminta (Tan ym., 2022).

Akunhallintajärjestelmälle on kaksi perusrakennetta: keskitetty ja hajautettu. Kuvassa 21 on esitetty keskitetyn BMS:n lohkokokaavio. Keskitetty BMS sisältää yhden keskitetyn ohjausyksikön, joka hallitsee ja valvoo koko akustoa. Tämä yksikkö kerää dataa kaikilta kennoilta tai moduuleilta ja käsittelee sen päätöksenteossa. Keskitetty järjestelmä on yksinkertainen ja kustannustehokas pienissä akuissa, koska se vaatii vähemmän laitteistoja. Haittapuolena on se, että suuremmissa järjestelmissä pitkät johdotukset voivat lisätä signaalihäiriöitä ja jännitehäviöitä. (Castrejon Suarez del Real, 2024f; Warner, 2015, s. 92)



**Kuva 21.** Keskitetty BMS (Warner, 2015, s. 93).

Hajautetun BMS:n toteutus on esitetty kuvassa 22. Se perustuu master-slave-periaatteen. Jokaisella kennolla tai kennoryhmällä on oma ohjausyksikkönsä (slave board). Nämä yksiköt toimivat itsenäisesti ja lähettävät tietoja keskusohjaimelle. Tämä järjestelmä vähentää johdotuksen tarvetta ja parantaa vikakestävyyttä, koska yksittäisen yksikön vikaantuminen ei kaada koko järjestelmää. Haittapuolena on järjestelmän korkeammat kustannukset ja monimutkaisempi laitteisto. (Castrejon Suarez del Real, 2024f; Linja-Aho, 2022, s. 62)

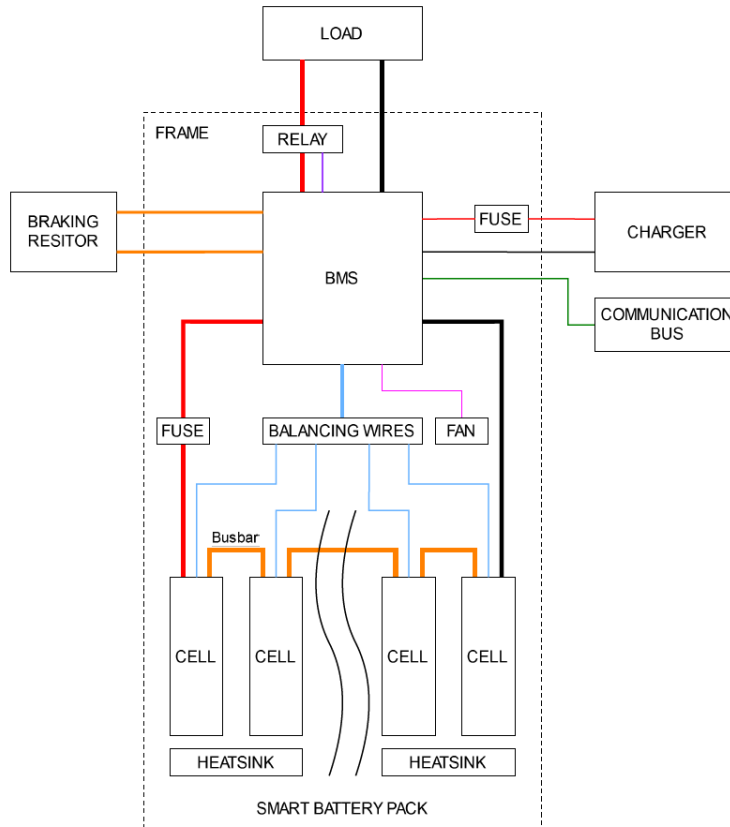


**Kuva 22.** Hajautettu BMS (Warner, 2015, s. 93).

Näistä järjestelmän rakenteista on olemassa useita muunnelmia. Toteutustapa määräytyy sen mukaan, miten järjestelmää aiotaan käyttää. Andrea (2010, s. 209) huomauttaa, että jokainen kunnollinen BMS voi suojata akkua, mutta paremmat ja hyvin suunnitellut BMS:t voivat pidentää akun käyttöikä, parantaa sen tehokkuutta ja lisäksi auttaa huomattavasti vian etsinnässä.

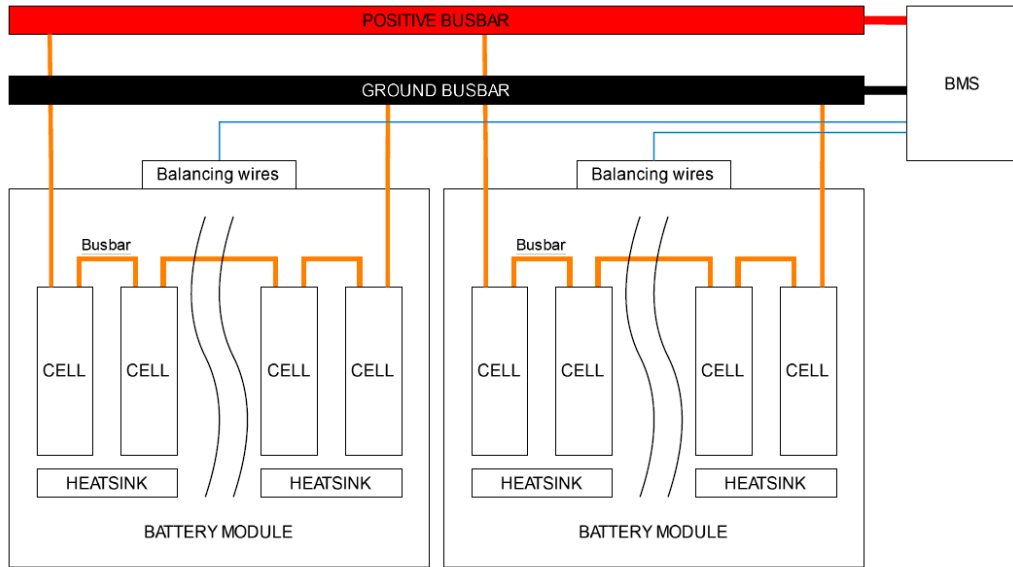
## 7.8 Akkujärjestelmän kokoonpano

Akkumoduulit ovat akkujärjestelmien perusalikoita. Niissä yksittäiset kennot yhdistetään yhdeksi mekaanisesti ja sähköisesti yhtenäiseksi kokonaisuudeksi. Moduuli sisältää litiumionikennoja tai muita kennotyyppejä, jotka yhdistetään virtakiskojen avulla. Lisäksi moduuli voi sisältää erilaisia oheiskomponentteja, kuten jäähdytyslevyjä ja puhaltimia. Kuva 23 esittää akkukokoonpanon tyypillisen rakenteen. Siinä BMS on integroitu akkukotelon sisään. (Castrejon Suarez del Real, 2024f; Warner, 2015, s. 131–133)



**Kuva 23.** Akkukokoonpano (Castrejon Suarez del Real, 2024f).

Useimmat akkuvalmistajat käyttävät modulaarisia ratkaisuja akustojen valmistamisessa. Akkumoduulien tai kennojen rinnankytkennässä kapasiteetit summautuvat, mutta jännite pysyy samana. Rinnankytkentää käytetään, kun järjestelmä tarvitsee enemmän virtaa ja kapasiteettia ilman jännitteen nostamista. Rinnankytkentä on hyödyllinen, kun halutaan pidentää laitteen käyttöaikaa tai tarjota enemmän virtaa suuritehoisille laitteille. Sarjakytkennällä saadaan puolestaan nostettua jännitettä kapasiteetin pysyessä samana. Usein tarvitaan sekä korkeampaa jännitettä että suurempaa kapasiteettia, jolloin akkuja voidaan kytkeä sekä sarjaan että rinnan. Kuva 24 havainnollistaa modulaarista kokoonpanoa. Siinä moduulit ovat kytketty yhteiseen virta- ja maadoituskiskoon (Warner, 2015, s. 133).



**Kuva 24.** Modulaarinen akkukokoonpano (Castrejon Suarez del Real, 2024f).

## 8. AKKUIHIN LIITTYVÄ LAINSÄÄDÄNTÖ

Euroopan komissio julkaisi 28. heinäkuuta 2023 uuden EU akkuasetuksen (2023/1542), joka koskee akkuja sekä akkujätettä. Tämä asetus korvasi aikaisemman EU akkudirektiivin (2006/66/EC) ja on sitova kaikissa jäsenvaltioissa ilman, että tarvitaan kansallista lainsäädäntöä. Asetus on tullut voimaan 17.8.2023 ja sen soveltaminen aloitettiin suurelta osin 18. helmikuuta 2024. Säädös koskee kaikkia EU jäsenmaita ja kattaa koko elinkaaren suunnittelusta ja tuotannosta aina kierrätykseen ja hävittämiseen. Uutta asetusta sovelletaan kaikkiin akku- ja paristoluokkiin, mukaan lukien sellaiset akut, jotka on yhdistetty tai lisätty tuotteisiin. (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 2023/1542, 2024; Martin, 2023)

Uudessa asetuksessa teollisuusakut luokitellaan seuraavasti: ” Teollisuusakkujen luokka käsittää monia erilaisia akkuja, jotka on tarkoitettu käytettäväksi teollisessa toiminnassa, viestintäverkoissa, maataloustoiminnassa tai sähköenergian tuotannossa ja jakelussa. Akkuja, joita on määrä käyttää teollisesti sen jälkeen, kun ne on valmisteltu käyttötarkoituksen muuttamiseen tai niiden käyttötarkoitus on muutettu, olisi pidettävä tässä asetuksessa tarkoitettuina teollisuusakkuina, vaikka ne oli alun perin suunniteltu eri käyttöön. Näiden eityhjentävien esimerkkitapausten lisäksi kaikki akut, jotka painavat yli 5 kg ja jotka eivät kuulu mihinkään muuhun tämän asetuksen mukaiseen luokkaan, olisi katsottava teollisuusakuiksi. ” (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 2023/1542, 2024)

Asetuksessa määrätään, että teollisuusakkujen tulee täyttää erityiset kestävyysvaatimukset. Tämä tarkoittaa muun muassa vähimmäiskierrätysprosentteja eri materiaaleille, kuten litiumille. Lisäksi asetukseen sisältyy digitaaliset akkupassit, jotka tulevat pakolliseksi helmikuussa 2027 muun muassa sähköajoneuvojen akuissa sekä yli 2 kWh:n teollisuusakuissa. Akkupassi sisältää kaikki saatavilla olevat tiedot kustakin akusta, esim. katodissa, anodissa ja elektrolyytissä käytetyt materiaalit sekä tietoa akun toimintakunnosta, kuten lataus- ja purkaussykleistä. Akkupassin on tarkoitus parantaa akkujen läpinäkyvyyttä ja jäljittävyyttä. Näin voidaan edistää kiertotaloutta, helpottaa akkujen kierrätystä ja uudelleenkäyttöä sekä varmistaa akkujen turvallinen ja kestävä käyttö. (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 2023/1542, 2024; Martin, 2023)

## 9. AKUSTOILLE ASETETTAVAT VAATIMUKSET

Dell ja Rand (2001, s. 32–33) korostavat, että akun valinta tiettyyn käyttökohteeseen ei ole suoraviivainen prosessi ja huomioonotettavia seikkoja on monia. Tärkeimmiksi ominaisuuksiksi he nostavat jännitteen, kapasiteetin, halutun teknisen suorituskyvyn ja kustannukset.

Valittaessa akustoratkaisua hydraulisen magneettigeneraattorin rinnalle, on selvítettävä sekä generaattorin että käytettävän nostomagneetin asettamat vaatimukset. Akusto valitaan generaattorin rinnalle hybridikäyttöön sekä varavoimaksi ainoaksi energian lähteeksi nostomagneetille generaattorin vikatilanteessa. Tässä luvussa selvitetään vaatimukset akustolle kumpaankin käyttökohteeseen. Haikalan ja Mikkosen (2011, s. 61) mukaan hyvä vaatimus on riittävän tarkka ja yksiselitteinen. Kuvatut vaatimukset kumpaankin käyttötarkoitukseen pyritään esittämään mahdollisimman tarkasti.

Vaatimukset ovat laadittu yhdessä yrityksen magneettigeneraattoreiden tuotevastuuryhmän, PRG (engl. Product Responsibility Group), kanssa. Kyseinen tuotevastuuryhmä koostuu magneettigeneraattoreiden sekä nostomagneettien tekniikan ydinosajista, johon lukeutuvat kaksi pääsuunnittelijaa, kaksi myyjää, projektipäällikkö sekä tuotannon edustaja. Yhteensä heillä on yli 50 vuoden kokemus magneettigeneraattoreiden sekä nostomagneettien kehittämisestä ja myynnistä. Ryhmän asiantuntemusta on hyödynnetty vaatimusten määrittelyssä. Koska kyseisiä tuotteita käytetään erilaisissa käyttöympäristöissä, ovat vaatimukset luotu tyyppilliseen käyttökohteeseen. Hybridi- ja turvatoimintokäyttöä varten suunnitellaan ensiksi ratkaisu, joka varmistaa järjestelmän toiminnan yleisimmissä käyttökohteissa. Tähän ratkaisuun päädyttiin tuotevastuuryhmän näkemyksien pohjalta. Tuotevastuuryhmässä korostettiin, että käyttöolosuhteet tulee huomioida asiakaskohtaisesti. Tämä voi edellyttää akustojen räätälöintiä esimerkiksi jäädytyksen suhteen. Tällaiset huomiot ovat esitetty vaatimusten yhteydessä. Seuraavissa alaluvuissa käydään ensiksi lävitse vaatimusten taustalla olevia seikkoja, minkä jälkeen vaatimukset esitetään yhteenvetona taulukoissa 6 ja 7. Luvussa 10 analysoidaan näiden vaatimusten pohjalta eri akkutyyppejä sekä akustoratkaisuja kumpaankin käyttötilanteeseen.

### 9.1 Hybridikäyttö

Akuston toimiessa generaattorin rinnalla, on niiden yhdessä pystyttävä tuottamaan käyttömagneetin tarvitsema teho  $P$ . Tehon ja tiedetyn käyttöjännitteen  $U$  perusteella saadaan las-

ketuksi nostomagneetin ottama kokonaisvirta  $I$ . Hybridikäytössä kokonaisvirta  $I$  on tarkoitus ottaa generaattorilta sekä akustolta, mikä mahdollistaa nostomagneetin käyttämisen pienemmän teholuokan generaattorilla. Rinnan kytketyistä jännitelähteistä Ahoranta (2002, s. 121) toteaa, että suuremman lähdejännitteen omaava jännitelähde kuormittuu enemmän. Tämän lisäksi luvussa 4.2 esitetty akun lähdejännitteen käyttäytyminen akun varustilan mukaan on hyvä huomioida akuston jännitettä suunniteltaessa. Akun varustilan laskiessa putoaa myös akun lähdejännite, minkä seurauksena generaattorin kuormitus kasvaa. Nostomagneetin tyypillinen käyttöaika on kuitenkin sen verran lyhyt, ettei jännitelähteiden erosta syntyvä kuormituksen epätasaisuus todennäköisesti aiheuta generaattorin ylikuormittumista. Kuormittumisen jakautuminen akuston ja generaattorin kesken esitetään testauksen yhteydessä luvussa 10. Samalla selvitetään mahdolliset ylikuormitustilan- teet.

Toinen tärkeä seikka akuston jännitettä mietittäessä on luvussa 4.1 todetut häviöt, joita akussa syntyy kaavan 4 (ks. s. 19) mukaisesti. Häviöihin vaikuttavat kemiallisten ominaisuuksien lisäksi akuston kuormitus. Kuormitetun akuston jännite (CCV) on pienempi kuin kuormittamattoman akuston jännite (OCV). Hybridikäyttöön tarkoitettujen akuston nimellisjännitteen tulisi olla mahdollisimman lähellä generaattorin tasasuunnattua jännitettä (220 VDC). Tällä varmistetaan akuston ja generaattorin tasainen kuormittaminen. Akustolta saatavaan virtaan vaikuttavat edellä mainittujen lisäksi akuston sijoituspaikka, sillä syöttöjoh- timien jännitehäviöt vaikuttavat kuormituksen jakautumiseen.

Akuston kapasiteetti  $Q$  saadaan kaavasta 6 (ks. s. 25) virran ja ajan ollessa tiedossa. Virraksi määritellään puolet kokonaisvirrasta aiempänä mainitun tasaisen kuormittamisen perusteella. Aika  $t$  määrittelee akustolta saatavan virran keston, ja sen tulee kattaa magneettinostimen käyttämiseen kuluva aika. Kapasiteetin määrittämisessä on hyvä ottaa huomioon akuston optimaalinen purkaussyvyysalue, joka vaikuttaa akun käyttöikäen. Xiong ym. (2020) toteavat tutkimuksessaan, että litiumioniakuilla DOD-alueen ollessa välillä 10–70 %, kapasiteetin säilytyskyky pysyy erinomaisena jopa 60 °C lämpötilassa. Vaikka korkeampi kapasiteetti lisää kustannuksia, lisää se merkittävästi myös akuston käyttöikäen. Tarvittava energiakapasiteetti wattitunteina saadaan määriteltäviä kapasiteetin  $Q$  ja jännitteen  $U$  tulona.

Jännitteen, virran ja kapasiteetin lisäksi akuston syklikesto, lataustilanne sekä käyttölämpötila-alue asettavat omat vaatimuksensa akustolle. Syklikesto on määriteltävä akustolta vaadittavan käyttöikäen mukaan arvioitujen vuorokausikohtaisten syklien perusteella. Nostomagneetin yleisten käyttökohteiden ja -tapojen perusteella syklikestoksi halutaan useita

tuhansia syklejä. Akuston lataaminen on pystyttävä suorittamaan generaattorin ohjauskortin kautta. Tällä vältetään erillisen laturin tarve, mutta kommunikointi akuston ja generaattorin välillä lataustilanteessa on välttämätöntä. Kommunikoinnilla varmistetaan akuston turvallinen lataaminen ja estetään ylilataaminen. Lisäksi kommunikointia vaaditaan purkaustilanteissa. Käyttölämpötila-alue määräytyy asiakkaan käyttökohteen mukaan. Akusto mitoitetaan tyypilliseen käyttökohteeseen siten, ettei jäähtytystä tarvita. Ääriämpötilojen tapauksessa nestekiertojärjestelmä tai muu lämmönhallintajärjestelmä voi tulla kyseeseen. Tällaisia tilanteita arvioidaan tapauskohtaisesti.

Lisäksi järjestelmän käyttöympäristö sekä laitteiden kommunikointi asettavat akustolle vaatimuksia, joita ovat:

- Tärinänkesto
- Paloturvallisuus
- IP-suojaluokka, joka estää haitallisen pölyn (IP65)
- CAN-tiedonsiirtoväylä

Nostomagneetin päälle ja pois kytkeminen (magnetointi ja demagnetointi) on tarkoitus suorittaa akusto irti kytkettynä. Akuston poiskytkentä ennen demagnetointia on erityisen tärkeää, koska magneettiin varastoitunut energia halutaan purkaa turvallisesti todennetulla tavalla. Generaattorin ohjauskortti on suunniteltu tätä varten. Taulukossa 6 on yhteenveto akustolle asetettavista vaatimuksista hybridikäyttöön.

**Taulukko 6. Yhteenveto akustolle asetettavista vaatimuksista hybridikäytössä.**

Vaatus		Huomiot
Jännite	220 VDC	Akuston nimellisjännite (ks. luku 4.2)
Kapasiteetti	$\geq 10$ Ah	Määräytyy käytettävän nostomagneetin perusteella
Energiakapasiteetti	$\geq 2,2$ kWh	Määräytyy käytettävän nostomagneetin perusteella
Jatkuva virranantokyky	$\geq 20$ A	Määräytyy käytettävän nostomagneetin perusteella
Huippu virranantokyky	$\geq 20$ A	Virtapiikkejä ei esiinny
Latauksen suorittaminen	Generaattorilla	

Syklikesto	$\geq 2\ 000$	
Lämpötila-alue, ympäristö	-20–40 (°C)	Tapauskohtainen
Suojausluokka	IP65	
BMS	Jonkinlainen	Mahdollistaa hallinnan ja valvonnan
Kommunikointi	CAN-väylä	BMS:n ja generaattorin välillä

## 9.2 Turvatoimintokäyttö

Akustolle asetettavat vaatimukset turvatoimintokäyttöön poikkeavat hybridikäytön vaatimuksista. Poikkeavuudet perustuvat käyttötilanteen eroavaisuuteen. Turvatoimintokäytössä akuston on toimittava ilman generaattoria. Erot hybridikäyttöön verrattuna ovat:

- Akuston on kytkeydyttävä päälle generaattorin vikatilanteessa
- Akuston virranantokyvyn on oltava riittävä kattamaan magneetin ottama kokonaisvirta
- Kapasiteetti määritellään halutun turvatoiminta-ajan perusteella, esim. 20 min.
- Syklikesto voidaan määritellä merkittävästi pienemmäksi, ja syväpurkaus on mahdollista
- Kapasiteetin ja syklikeston määrittelyyn vaikuttavat generaattorien vikatilanteiden esiintyvyys
- Turvatoimintokäytössä akuston on oltava toimintavalmiudessa vikatilanteen sattuessa. Tämä edellyttää akustolle suoritettavaa ylläpitolatausta tai varaustilan säännöllistä varmistamista.
- CAN-tiedonsiirtoväylää tai kommunikointia muun järjestelmän kanssa ei tarvita

Yhteenvedo akustolle asetettavista vaatimuksista turvatoimintakäytössä on esitetty alla olevassa taulukossa 7.

**Taulukko 7. Yhteenveto akustolle asetettavista vaatimuksista turvatoimintokäytössä.**

Vaatus		Huomiot
Jännite	220 VDC	
Kapasiteetti	$\geq 20$ Ah	Määräytyy käytettävän nostomagneetin perusteella
Energiakapasiteetti	$\geq 4,4$ kWh	Määräytyy käytettävän nostomagneetin perusteella
Jatkuva virranantokyky	$\geq 40$ A	Määräytyy käytettävän nostomagneetin perusteella
Huippu virranantokyky	$\geq 40$ A	Virtapiikkejä ei esiinny
Latauksen suorittaminen	Generaattorilla	
Syklikesto	100	Huomattavasti pienempi kuin hybridikäytössä
Lämpötila-alue, ympäristö	-20–40 (°C)	Tapauskohtainen
Suojausluokka	IP65	
BMS	Ei vaadita	Akuston turvallinen toiminta silti varmistettava
Kommunikointi	CAN-väylä	

Vaatimukset akustoille kumpaankin käyttötilanteeseen määrittelevät pääosin käyttötilanteet. Reunaehdot: jännitetaso ja virranantokyky määräytyvät generaattorin ja nostomagneetin perusteella, mutta muihin vaatimuksiin vaikuttavat merkittävästi käyttökohteet ja -tilanteet. Esimerkiksi nostomagneetin käyttöajat vaikuttavat kapasiteetin mitoitukseen ja käyttöympäristö lämpötilanhallintaan. Eriksson (2024) toteaa, että C-arvon ollessa 1 C, ei jäähdystä tarvita. Hän mainitsee lataustilanteen olevan kriittisempi lämpötilan kannalta. Esimerkiksi litiumioniakuille sallittu lämpötila-alue lataustilanteessa on 5–45 °C (Buchmann, 2022). Näiden mainittujen vaatimusten ohella akustojen on oltava CE-merkityjä ja niiden on vastattava konedirektiivin sekä luvussa 8 esitetyn uuden EU akkuasetuksen (2023/1542) vaatimuksia.

### **9.3 Taloudelliset vaatimukset akustoille**

Teknisten vaatimusten ohella, akustoille asetetaan taloudellisia vaatimuksia, joita ovat:

1. Investointikustannukset
2. Energian säästö hybridikäytössä
3. Akustoratkaisun elinkaari ja takaisinmaksuaika

Näitä vaatimuksia ei määritellä tarkemmin tässä työssä. Ne on tarkoitus selvittää hybridikäyttöisen akuston testausvaiheessa, ja kuuluvat jatkokehitystoimenpiteisiin.

## 10. AKUSTORATKAISUIDEN ANALYSOINNIT JA TESTAUS

Sopivimman akun löytäminen kuhunkin käyttökohteeseen edellyttää usein eri akkutyypin vertailua. Tässä luvussa tarkastellaan tärkeimpiä ominaisuuksia ja eroja, joilla akkutyypit erottuvat toisistaan. Eri akkutyypin vertailun ja analysoinnin ohella analysoidaan vaihtoehtoisia akustoratkaisuja. Analysoinnissa painotetaan aikaisemmassa luvussa 9 esitettyjä vaatimuksia. Näiden lisäksi esitetään hybridikäyttöiselle generaattorille tehtyjä testejä. Testauksien avulla havainnollistetaan järjestelmän toimintaa, mutta yksityiskohtaisempia tuloksia ei esitetä yrityksen toiveiden mukaisesti.

### 10.1 Akkutyypit

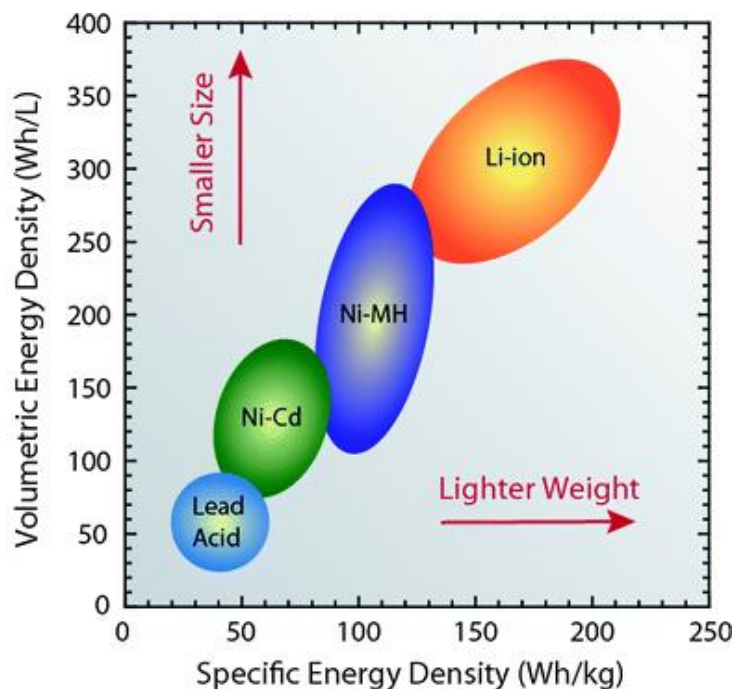
Eri akkutyypin vertailutaulukko on esitetty liitteessä B. Kyseiseen taulukkoon on listattu yleisimpien markkinoilla olevien akkujen pääominaisuuksia. Linja-Ahon (2022, s. 22) mukaan jokaisella akkutyypillä on toistakymmentä ominaisuutta, jotka ratkaisevat akun soveltuvuuden tiettyyn käyttökohteeseen. Hän toteaa, että eri akkutyypin sisällä esiintyy vaihteluita, ja kehottaa tarkastamaan akun tarkat ominaisuudet valmistajan datalehdessä. Liitteen vertailutaulukko on suuntaa antava, mutta sen avulla saa käsityksen eri akkutyypin tyypillisistä ominaisuuksista.

Soveltuvimmat akkutyypit ovat AGM-lyijyakku, NiMH-akku, sekä litiumioniakuista LFP ja LTO. Nämä akkutyypit valikoituivat poissulkemalla vaihtoehdot, jotka eivät sovellu kyseisiin käyttökohteisiin. Poissuljetut akut ovat avoin lyijyakku sekä NiCd-akku. Käyttökohde huomioiden ei luvussa 6.1 käsitelty avoin lyijyakku täytä asetettuja vaatimuksia esimerkiksi värinänkeston osalta. Nestemäinen elektrolyytti pääsee liikkumaan kennon sisällä, mikä voi tarisevissa olosuhteissa aiheuttaa vuotoja. Lisäksi akkuun tarvitsee elektrolyytin haihtumisen seurauksena lisätä aika ajoin vettä. Suljetuista lyijyakuista valikoitui AGM-akku. AGM- ja geeliakuille suoritettiin vertailu valmistajien datalehtien perusteella. AGM-akku valikoitui sen paremman virranantokyvyn seurauksena. NiCd-akku puolestaan hylätään RoHS-direktiiviin nojaten.

Litiumioniakkujen graafinen vertailu on esitetty liitteessä A. Liitteessä on esitetty graafisesti eri litiumioniakkujen ominaisuuksia. Litiumioniakuista valikoituivat LFP-akut sekä LTO-akut. LTO-akut erottuvat muista litiumioniakuista omaten huomattavasti suuremman syklikeston: jopa yli kymmenentuhatta. Tämän lisäksi korkea lataus- ja purkausvirta sekä toiminta laajalla lämpötila-alueella tekevät LTO-akuista sopivan

vaihtoehdon hybridikäyttöön, jossa syklejä tulee runsaasti. Haittapuolena ovat korkeammat kustannukset ja pienempi energiatiheys. LFP-akut puolestaan erottuvat etenkin turvallisuutensa ansiosta. Lisäksi niillä on myös varsin hyvä syklikesto. Vaikka LTO-akuilla on vielä parempi syklikesto, ovat LFP-akut kustannustehokkaampia. Yksi syy näiden kahden akkutyypin valitsemiselle on vastuullisuus. Näissä akuissa ei käytetä harvinaisempia mineraaleja: nikkeliä tai kobolttia. Esimerkiksi Baumann-Paulyn (2023) mukaan Kongossa, jossa suurin osa käytetystä koboltista tuotetaan, esiintyy erilaisia eettisiä ongelmia. Vastuullisuusnäkökulman ohella näitä mineraaleja sisältävien akkujen huonona puolena on hinta, sillä materiaalien harvinaisuus nostaa akkukennojen hintaa.

Keskinäisen vertailun perusteella parhaat vaihtoehdot ovat LFP- ja LTO-akut. Hybridikäyttöä ajatellen nämä ovat ylivoimaiset valinnat syklikeston mukaan. Näiden valintaa tukee myös akkujen kyky varastoida energiaa paino- ja tilavuusyksikköä kohden. Näitä ominaisuuksia on havainnollistettu kuvassa 25. Litiumioniakut ovat sekä ominaisenergian (vaaka-akseli) että energiatihedyn (pysty-akseli) perusteella akkujen kärkijoukossa.



**Kuva 25.** Akkujen energiaominaisuudet (Weimar, 2019).

Litiumioniakkujen huonona puolena on niiden suuri hinta. Tarjouskyselyjen perusteella järjestelmäämmä soveltuvalla LFP-akustolle tulee hinnaksi useita tuhansia euroja. AGM-akkujen tapauksessa kustannukset ovat alle tuhannen euron. Litiumioniakustojen hintaan sisältyy BMS, joka on Andrean (2020, s. 211) mukaan pakollinen kaikille litiumioniakuille, kuten luvussa 7 todettiin.

Vertailutaulukon, liite B, perusteella AGM-akut eivät sovellu syklikestoltaan hybridikäyttöön. Turvatoimintokäyttöä ajatellen ne kuitenkin kattavat kaikki tarvittavat vaatimukset. AGM-akkujen huono puoli on niiden alhainen ominaisenergia, joka tarkoittaa käytännössä painavaa akustoa. Tämä ei ole kriittinen tekijä turvatoimintokäytössä.

NiMH-akut ovat soveltuva ratkaisu kumpaankin käyttökohteeseen, mutta ne eroavat litiumioniakuista etenkin syklikestoltaan. NiMH-akkujen hintataso on alhaisempi kuin litiumioniakuilla, mutta korkeampi kuin AGM-akuilla.

## 10.2 Akustoratkaisut

Akustoratkaisuiden analyysissä keskitytään akkujen modulaarisen kokoonpanon lisäksi mahdollisesti tarvittaviin lämmönhallinta- ja akunhallintajärjestelmiin, joita käsiteltiin luvussa 7.

Modulaarinen akustoratkaisu on sekä hybridi- että turvatoimintokäyttöä ajatellen tarpeellinen. Modulaarisuuden avulla pystytään vastaamaan eri asiakkaiden tarpeisiin ja kattamaan hydraulisen magneettigeneraattorin sekä nostomagneetin eri teholuokat. Kytkemällä moduuleja sarjaan, saadaan jännitetasoksi järjestelmän vaatimusten mukainen 220 VDC. Akkumoduulien rinnankytkennällä voidaan puolestaan lisätä kapasiteettia, virranantokykyä sekä akuston syklikestoa. Tehdyn tutkimuksen perusteella suurin osa akkuvalmistajista tarjoaa valmiita akkumoduuleja. Esimerkiksi Micropower Group -yrityksen valikoimiin kuuluvat modulaariset Lionbrix-akustot.

BMS on vaatimuksena akustolle hybridikäytössä, sillä sen avulla saadaan valvottua, hallittua ja optimoitua akuston käyttöä. Lisäksi sen avulla saadaan kerättyä dataa järjestelmän toiminnasta. Hybridikäyttöön soveltuvan BMS:n rakenteen määrää akkukennojen ja niistä koostuvien moduulien lukumäärä. Valmistajat tarjoavat akustoille ja akkumoduuleille valmiita BMS ratkaisuja sovelluskohteiden tarpeet huomioiden.

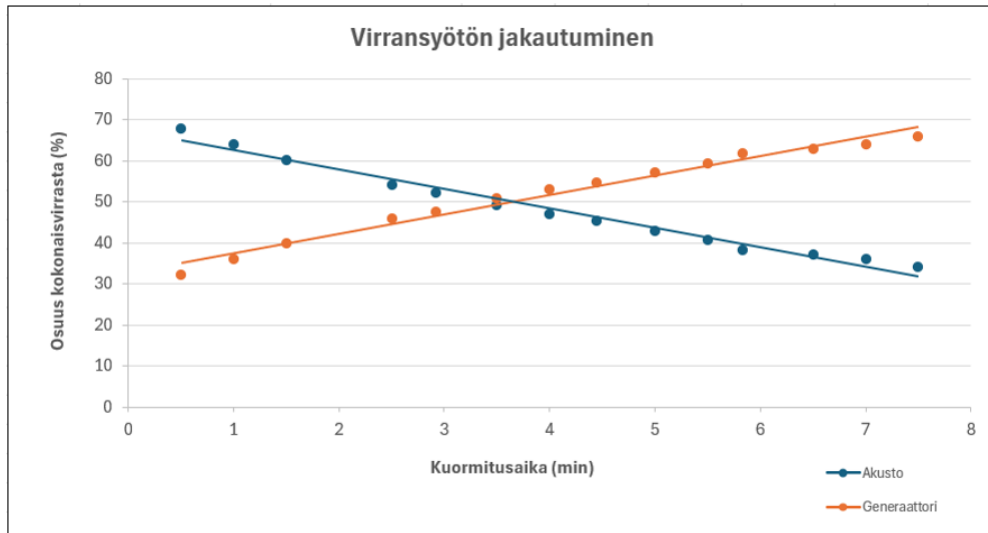
Akustojen lämmönhallintaan vaikuttavat merkittävästi niiden käyttöolosuhteet. Lämmönhallintajärjestelmän tarpeellisuuteen voidaan vaikuttaa akuston mitoituksella. Akuston kapasiteettia kasvattamalla saadaan pienennettyä C-arvoa. Kuten Eriksson (2024) toteaa, arvon ollessa enintään yksi ei jäähdytystä tyypillisesti tarvita. Akustojen käyttö alle 0 °C lämpötiloissa edellyttää akustojen lämmitystä. Tämä voidaan toteuttaa nestekierron avulla, joka mahdollistaa akuston jäähtymisen sekä lämmityksen.

### 10.3 Akuston testaus generaattorin rinnalla

Saatujen tulosten perusteella testattiin akuston toimintaa generaattorin rinnalla. Tällä varmistettiin akuston ja järjestelmän toimimisen lisäksi generaattorin ohjauksen käyttäytyminen hybriditilanteessa. Testaukseen valikoituivat AGM-akut litiumioniakkujen sijaan. Syynä valinnalle olivat AGM-akkujen edullisuus sekä turvallisuus. Testauksessa AGM-akut olivat kytketty sarjaan tarvittavan jännitetason (220 VDC) saavuttamiseksi. Testausjärjestely on esitetty kuvassa 26. Generaattoria käytettiin koeajokoneikolla, joka näkyy kuvassa taka-alalla. Akuston kytkemisviiveiden mahdollistamiseksi sähkökeskukseen toteutettiin ohjauspiiri. Ohjaus tapahtui IFM:n ohjelmoitavan logiikan sekä kontaktorien avulla. Viiveiden avulla akusto kytkettiin pois ennen demagnetointia. Testauksessa mitattiin generaattorin ja akuston syöttämää virtaa nostomagneetille sekä akuston napajännitettä. Syöttövirtojen jakaantumista akuston ja generaattorin kesken havainnollistaa kuva 27. Kuvasta selviää akuston syöttövirran olevan alussa suurempi kuin generaattorin, mutta akuston napajännitteen laskiessa tilanne muuttuu päinvastaiseksi.

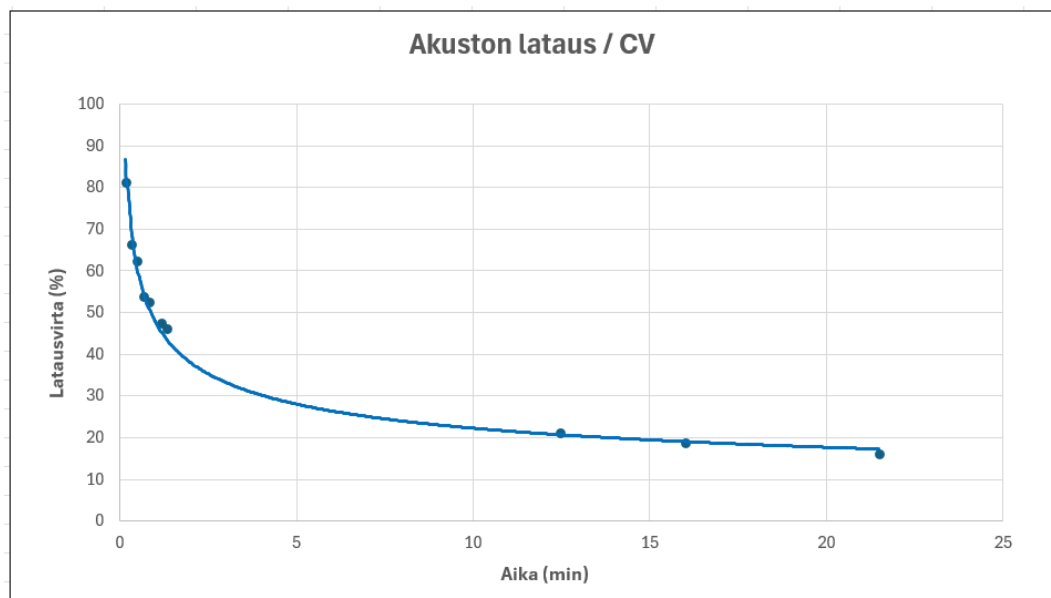


*Kuva 26. Testausjärjestely.*



**Kuva 27.** Virransyötön jakautuminen akuston ja generaattorin kesken.

Nostomagneetin käyttämisen lisäksi testattiin akuston lataamista generaattorin avulla. Kyseisten AGM-akkujen tekniset tiedot tarkistettiin datalehdessä, ja näiden pohjalta suoritettiin koko akuston lataaminen. Lataus suoritettiin vakiojännitelataustavalla, jota akuille datalehdessä suositellaan. Latauskäyttäytyminen on havainnollistettu kuvassa 28. Kuvassa latausvirta on esitetty ajan funktiona (vrt. kuva 16 luku 5.2). Latausvirta on suurimmillaan latauksen alkuvaiheessa akuston varaustilan ollessa pieni. Varaustilan kasvaessa akuston jännite lähenee latausjännitettä, jolloin latausvirta pienenee.



**Kuva 28.** Akuston latauskäyrä.

# 11. TULOKSET

Tässä luvussa esitetään työn tulokset. Tuloksissa kerrotaan analysoinnin sekä teoriaosuiden pohjalta valitut akustoratkaisut hybridi- ja turvatoimintokäyttöön. Asetettuihin tutkimuskysymyksiin vastataan seuraavassa luvussa 12.

## 11.1 Hybridikäyttö

Hydraulisen magneettigeneraattorin rinnalle litiumioniakku on vahvin vaihtoehto. Litiumioniakuista parhaat vaihtoehdot ovat LFP- ja LTO-akut. Hybridikäytössä tärkeimpänä kriteerinä on syklikesto, joka litiumioniakuilla on muihin akkutyyppeihin verrattuna ylivoimainen. Etenkin LTO-akkujen syklikesto, jopa yli 10 000, on merkittävä tekijä huomioiden akuston käyttöikä. Syklikestoon voidaan vaikuttaa kapasiteettia kasvattamalla, mutta silloin akuston koko kasvaa. Kohdeyrityksen strategian mukaisesti pyritään mahdollisimman kompakteihin tuotteisiin. Tähän tavoitteeseen vaikuttavat ominaisenergia ja energiatiheys, jotka määräävät akuston massan ja tilavuuden. Nämä ominaisuudet ovat litiumioniakuilla erinomaiset verrattuna muihin akkutyyppeihin (ks. Kuva 25).

LFP- ja LTO-akkujen hyviä puolia ovat turvallisuus sekä harvinaisten mineraalien puuttuminen, mikä mahdollistaa edullisemmän valmistuksen. Kokonaiskustannuksiltaan litiumioniakusto on lyijyakustoa ja NiMH-akustoa korkeampi, mutta alhaisen syklikeston vuoksi ei jäljempänä mainitut sovellu hybridikäyttöön. Haittapuolena NiMH-akuissa on lisäksi mahdollisesti esiintyvä muisti-ilmiö, jota käsiteltiin nikkelpohjaisten akkujen yhteydessä (luku 6.2). Tämä ilmiö on erityisen haitallinen hybridikäytössä, jossa akusto voidaan toistuvasti purkaa vajavaisesti.

LFP- ja LTO-akut ovat litiumioniakuista turvallisimmat, mutta kaikki litiumioniakut vaativat aina akunhallintajärjestelmän (BMS) turvallisuuden varmistamiseksi. Tämä lisää kustannuksia, mutta mahdollistaa akuston toiminnan optimoinnin ja datan keräämisen. Kustannustehokas ja toimiva perusratkaisu järjestelmään on keskitetty BMS, sillä akuston kennojen lukumäärä on suhteellisen pieni. BMS ohjaa kennojen tasapainotusta ja lämmönhallintaa. Riittävällä kapasiteetin mitoituksella vältetään jäädytysjärjestelmän tarvitseminen, mutta kylmissä olosuhteissa akuston esilämmitys on tarpeen. Esilämmitystä varten akustossa on hyvä olla optio nestekiertoa varten, jota voidaan käyttää myös jäädytyksessä.

Hybridijärjestelmässä paras ratkaisu on modulaarinen akusto, joka mahdollistaa kustannustehokkaan kapasiteetin lisäämisen asiakkaan tarpeet huomioiden. Tyypillisesti akkujen

valmistajat käyttävät akkumoduuleja, joilla kapasiteetin lisäksi saadaan säädettyä oikea jännitetaso. Taulukossa 8 on esitetty yhteenveto hybridikäyttöön valittavasta akustosta.

**Taulukko 8.** Tulos hybridikäyttöön valittavasta akustosta.

Akkutyyppe	Litiumioni
Akkukemia	LFP/LTO
Jännite	220 VDC
Kapasiteetti	$\geq 10$ Ah
Energiakapasiteetti	$\geq 2,2$ kWh
Kokoonpano	Modulaarinen, mahdollistaa eri teholuokat
BMS	Keskitetty (määräytyy käytännössä valmistajan mukaan)
Lämmönhallinta	Tarvittaessa nestejäähdytys, jota hyödynnetään myös esilämmityksessä

## 11.2 Turvatoimintokäyttö

Turvatoimintokäyttöön, turvaamaan hydraulisen magneettigeneraattorin toiminta vikatilanteessa, paras vaihtoehto on AGM-akut. Näiden sarjaan kytkennällä saadaan tarvittava jännite ja rinnan kytkennällä kapasiteetti, joka määräytyy turvatun magneettinostimen tehon sekä halutun turva-ajan perusteella. AGM-akkujen ominaisuudet sekä edullisuus tekevät niistä optimaalisen valinnan turvaamaan generaattorien toiminta. AGM-akkujen tärkeimmät ominaisuudet turvatoimintokäyttöä ajatellen ovat:

1. Edullisuus. AGM-akustoratkaisun hintataso on kymmenesosa verrattuna litiumioniakkuratkaisuun.
2. Turvallisuus ja luotettavuus. AGM-akkujen suljettu rakenne estää elektrolyytin vuotamisen ja kaasujen vapautumisen.
3. BMS-järjestelmää ei vaadita. AGM-akkujen lämpötilan sietokyky sekä vakaa akkukemia takaavat turvallisen toiminnan ilman akunhallintajärjestelmää.
4. Yksinkertainen lataustekniikka. AGM-akut voidaan ladata vakiojännitelataustavalla, mikä on helppo toteuttaa generaattorin avulla.

5. Huoltovapaus. Akuston käyttöikä on pitkä ilman lisätoimenpiteitä.
6. Virranantokyky. AGM-akut pystyvät tarjoamaan suuren virran.
7. Syväpurkauksien kesto. AGM-akut kestävät hyvin syväpurkauksia, jolloin akuston kapasiteetti voidaan mitoittaa pienemmäksi.
8. Alhainen itsepurkautuminen. Vaaditaan harvemmin akuston lataamista.
9. Mekaanisen rasituksen kesto. AGM-akut kestävät hyvin tärinää ja iskuja.

Nämä seikat tekevät AGM-akuista turvallisen ja kustannustehokkaan valinnan työkonetyöhön, jossa käyttöolosuhteet voivat olla hyvinkin haastavia. Modulaarisuus on helppo toteuttaa AGM-akkujen määrää muuttamalla tai suuremman kapasiteetin akuilla. Taulukko 9 esittää yhteenvedon turvatoimintokäytön tuloksesta.

**Taulukko 9.** Tulos turvatoimintokäyttöön valittavasta akustosta.

Akkutyyppe	Lyijyakku
Akkumalli	AGM
Jännite	220 VDC
Kapasiteetti	≥ 20 Ah
Energiakapasiteetti	≥ 4,4 kWh
Kokoonpano	12 VDC akkujen sarja- ja rinnankytkentä (tarvittavan ajan ja tehon mukaan)
BMS	Ei tarvitse
Lämmöhallinta	Käyttökohteen tarpeen mukaan

## 12. POHDINTA

Työn tavoitteena oli akkutekniikan selvityksen pohjalta valita akustoratkaisut kahteen eri tapaukseen: hybridi- ja turvatoimintokäyttöön. Kirjallisuuskatsauksen avulla perehdyttiin varsin kattavasti akkujen toimintaperiaatteeseen sekä eri akkutyyppeihin ja niiden ominaisuuksiin. Myös akustoratkaisuiden toteuttamiseen tutustuttiin: lämmönhallintajärjestelmät sekä akunhallintajärjestelmät käsiteltiin. Tämän teoreettisen taustan pohjalta suoritettiin eri akkutyyppeiden ja akustoratkaisuiden analysointi, jonka perusteella valittiin akustoratkaisut kumpaankin käyttökohteeseen.

Teoreettisessa osuudessa käsiteltiin hiukan syvällisemmin akkujen sisäistä rakennetta, vaikkei tietoa varsinaisesti tarvita valittaessa akkuja tiettyyn sovellukseen. Akkujen syvälisempi ymmärtäminen auttaa kuitenkin hahmottamaan erilaisten tilanteiden vaikutusta akkujen käyttäytymiseen ja mahdollistaa niiden turvallisemman käyttämisen. Teorian pohjalta on helpompi käsittää, että akkujen valinnassa on usein tehtävä kompromisseja eri ominaisuuksien suhteen.

### 12.1 Tulosten arviointi

Saadut akustoratkaisut soveltuvat käyttökohteisiinsa, mutta pelkästään teoreettisen analysoinnin pohjalta on hyvin vaikeaa valita optimaaliset akustoratkaisut. Akuston suorituskykyyn vaikuttavia eri parametreja on lukuisia, eikä niiden kaikkien vaikutusta ollut mahdollista testata käytännössä rajallisten aika- ja testausympäristöresurssien vuoksi. Eri muuttujien vaikutuksia akustojen suorituskykyyn olisi mahdollista tarkastella simuloinnin avulla, mutta simulointi jätettiin tämän työn ulkopuolelle. Simuloinnin sijaan haluttiin keskittyä käytännön testaamiseen, sillä ennen varsinaista optimointia haluttiin varmistaa järjestelmän toiminta ja käyttäytyminen. Järjestelmän toiminta hybridikäyttöisenä testattiin AGM-akustolla, joka valikoitui analysoinnin ja eri akkutyyppeiden vertailun perusteella. Ideaalitalanne olisi ollut testata analysoinnin pohjalta hybridikäyttöön valittua litiumioniakustoa, mutta tämä ei ollut mahdollista rajallisten resurssien vuoksi. Testauksen perusteella akuston toiminta generaattorin rinnalla todennettiin toimivaksi ratkaisuksi, mutta mahdollisesti saatavaa energian säästöä ei tässä työssä testattu.

Työn alussa määritettiin kolme tutkimuskysymystä:

1. Mitkä ovat hydraulisen magneettigeneraattorin asettamat vaatimukset akustolle?

2. Mitä vaatimuksia hydraulisen magneettigeneraattorin nostomagneetti asettaa akustolle?
3. Mikä akkutekniikka ja millainen akustoratkaisu täyttävät kohtien 1 ja 2 vaatimukset?

Tutkimuskysymyksiin 1 ja 2 saatiin vastaukset luvussa 9. Nämä kaksi tutkimuskysymystä olivat työn tavoitteiden kannalta tärkeitä, sillä ne käsittelivät järjestelmän toiminnan kannalta kriittisiä arvoja. Niihin saatiin vastaukset, mutta niiden ulkopuolelle jäi merkittävä akuston ominaisuuksiin vaikuttava seikka: järjestelmän käyttäminen. Tätä ei katettu myöskään tutkimuskysymyksessä 3, joka oli rajattu huonosti. Kysymykseen 3 vastaavia ratkaisuvaihtoehtoja on periaatteessa lukematon määrä. Todellisuudessa haluttiin tutkia järjestelmään soveltuvaa optimaalista ja kustannustehokasta akustoratkaisua. Etenkin hybridikäytössä, järjestelmän käyttäminen ja käyttöolosuhteet asettavat merkittävät vaatimukset optimaaliselle akustoratkaisulle. Tutkimuskysymyksen 3 asettaminen olisi pitänyt harkita paremmin. Parhaimmillaan se olisi liittynyt tiettyyn käyttökohteeseen valittavaan akustoratkaisuun. Tämä olisi mahdollistanut tarkat ja yksiselitteiset vaatimukset sekä niiden perusteella valitun ideaalisen akustoratkaisun.

Vaikka tutkimuskysymyksissä olisi ollut parannettavaa, auttoivat ne silti keskittymään perusideaan, eli akkutekniikan selvitykseen hydraulinen järjestelmä huomioiden.

## 12.2 Käytetyn aineiston ja tulosten luotettavuus

Työssä teoriaosuuden pohjana käytettävää materiaalia voidaan pitää luotettavana. Ensimmäisesti pyrittiin käyttämään vertaisarvioituja julkaisuja, mutta vertaisarvioinnin puuttuessa julkaisun tieto pyrittiin varmistamaan useammasta lähteestä. Akkutekniikan julkaisuja on tarjolla runsaasti ja akkutekniikka kehittyy jatkuvasti. Tästä syystä käytettiin mahdollisimman uusia julkaisuja.

Valittuja akustoratkaisuja voidaan pitää sopivina työssä esitettyihin tarkoituksiin. Ne soveltuvat tyyppillisiin käyttöolosuhteisiin, mutta käyttöä ääriolosuhteissa, kuten erittäin kylmissä lämpötiloissa, tulee arvioida tarkemmin tapauskohtaisesti. Työssä käsitelty akuston lämmönhallinta nousee tällaisissa tilanteissa kriittiseksi tekijäksi akuston turvallisuuden ja käyttöiän turvaamiseksi.

Saadut akustoratkaisut ovat suunniteltu magneettinostimen toiminta ja käyttöolosuhteet huomioiden kahteen eri tapaukseen: hydraulisen magneettigeneraattorin rinnalle sekä ai-noaksi tehonlähteeksi nostomagneetille. Akustoratkaisu kuhunkin käyttökohteeseen täytyy

suunnitella käyttökohteen mukaan, mutta työ antaa varsin kattavan analyysin eri akkutyyp-  
pien ominaisuuksista. Analysoinnin perusteella on mahdollista tutkia eri akkutyyp-  
pien soveltuvuutta erilaisiin sovelluksiin.

### **12.3 Tulosten arvo kohdeyritykselle**

Tämän työn teoreettinen osuus antaa hyödyllistä tietoa akkutekniikasta ja eri akkutyyp-  
peistä. Saatua tietoa on hyödynnettävissä erilaisissa akkukäyttöisissä sovelluksissa. Teo-  
riaosiossa esitettyjen käsitteiden ymmärtäminen on välttämätöntä akkujen sekä niihin liit-  
tyvien komponenttien hankinnassa.

Varsinaiset työn tulokset, akustoratkaisut, tukevat yrityksen strategisia tavoitteita kohti  
sähköisiä tuoteperheitä. Vaikka akuston ja generaattorin hybriditoimintojärjestelmän toi-  
minta varmistettiin, vaatii se vielä lisätestejä ennen valmista tuotetta. Etenkin hybridijär-  
jestelmän tuomat kustannussäästöt ja akuston takaisinmaksuaika ovat mielenkiintoisia jat-  
kotutkimuskohteita. Ihannetilanteessa tästä työstä saadut hyödyt konkretisoituisivat val-  
miina tuotteina, jotka tukevat yrityksen vihreitä arvoja.

### **12.4 Jatkokehitysehdotukset**

Tässä työssä varmistettiin akustoratkaisun toiminta hydraulisen järjestelmän rinnalla. Tes-  
tauksia on hyvä jatkaa selvittämällä akuston tuoma energiansäästö hybriditilanteessa. Kan-  
nattavuuden selvittämisen jälkeen testaus ääriolosuhteissa antaisi kuvan järjestelmän toi-  
mimisesta erilaisissa ympäristöissä. Testauksissa voitaisiin hyödyntää simulointia. Vaikka  
simuloinnilla ei pystytä kaikkia reaali maailman muuttujia ottamaan huomioon, saataisiin  
sillä tarkempaa tietoa akustojen käyttäytymisestä ja pystyttäisiin alustavasti arvioimaan eri  
asiakkaiden käyttöolosuhteiden vaikutuksia akustoihin. Simuloinnin ohella akustoratkai-  
sun tarjoaminen pilottikohteeseen mahdollistaisi hyödyllisen tiedonkeruun järjestelmän  
toiminnasta.

Mielestäni akkutekniikkaan kannattaa panostaa. Muun muassa sähköajoneuvojen kehittä-  
misen seurauksena akustoja ja niissä käytettäviä materiaaleja tutkitaan paljon. Esimerkiksi  
Vänskä (2020) toteaa pro gradu -tutkielmassaan, että akkuteknologiaan uskotaan vahvasti,  
ja sen merkitys päästöttömässä yhteiskunnassa tulee olemaan merkittävä. Tässä työssä kes-  
kityttiin markkinoilla oleviin akkutyyppeihin, mutta myös uusien akkutyyp-  
pien kehittä-  
mistä kannattaa seurata aktiivisesti. Lisäksi akustot voisivat tarjota taloudellisen vaihtoeh-  
don yrityksen koeajojärjestelyihin.

Jatkotutkimuskohteeksi suosittelen superkondensaattoreita. Tutkimuksen aikana superkondensaattorit nousivat esille erilaisten sovellusten yhteydessä. Niiden soveltuvuutta kehiteltävään järjestelmään kannattaa tutkia. Erityisesti superkondensaattorien mahdollistama nopea energian talteenotto olisi hyödyllistä järjestelmän kokonaishyötysuhdetta ajatellen. Esimerkiksi sähköajoneuvoissa käytetään akuston ja superkondensaattorien yhdistelmää jarrutusenergian hyödyntämisessä. Sähköajoneuvoissa käytettävää tekniikkaa voisi selvittää muutenkin tarkemmin, sillä uskon sen tuovan paljon erilaisia kehitysideoita yrityksen erilaisiin kehitysprojekteihin.

Superkondensaattorien ohella vetyteknologia nousi esiin tehdyn tutkimuksen aikana. Esimerkiksi Aalto-yliopiston professori Tanja Kallio kertoo Linja-ahon haastattelussa (Linja-aho, 2022, s. 136), että vetyteknologia, etenkin polttokennot, ovat aito vaihtoehto akuille. Vetyteknologian kehittyminen ja sen tuomat mahdollisuudet saattaisivat olla hyödyllisiä tutkimusaiheita tulevaisuudessa.

# LÄHTEET

A Guide to Understanding Battery Specifications. (2008). Massachusetts Institute of Technology. Saatavissa (viitattu 14.8.2024): [https://web.mit.edu/evt/summary\\_battery\\_specifications.pdf](https://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf)

Abraham, K. M. (2020). How Comparable Are Sodium-Ion Batteries to Lithium-Ion Counterparts? *ACS Energy Letters*, 5(11), 3544–3547. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.0c02181>

Ahoranta, J. (2002). *Sähkötekniikka* (1.–5. painos). WSOY.

Amp Nova. (2024). Why Choose LiFePO4 Prismatic Cells For Your Next Energy Project?

Andrea, D. (2010). *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*. Artech House.

Andrea, D. (2020). *Lithium-ion batteries and applications. Volume 1: Batteries*. Artech House.

Arora, P., & Zhang, Z. (John). (2004). Battery Separators. *Chemical Reviews*, 104(10), 4419–4462. <https://doi.org/10.1021/cr020738u>

Avant Power leaps to the forefront of innovative battery technology. (2022). *Avant magazine*.

Awati, R. (2024). Lithium Polymer Battery (LiPo). TechTarget. <https://www.techtarget.com/whatis/definition/lithium-polymer-battery-LiPo>

Batteries News. (2024). Advanced Cell Contacting System Structure Helps Mitigate Unwanted Hotspots in EV Batteries.

Baumann-Pauly, D. (2023). Cobalt Mining in the Democratic Republic of the Congo: Addressing Root Causes of Human Rights Abuses. Geneva Center for Business and Human Rights. [https://bhr.stern.nyu.edu/wp-content/uploads/2023/02/NYUCBHRcobaltMining\\_FINAL-Feb7.pdf](https://bhr.stern.nyu.edu/wp-content/uploads/2023/02/NYUCBHRcobaltMining_FINAL-Feb7.pdf)

Bertuol, D. A., Bernardes, A. M., & Tenório, J. A. S. (2006). Spent NiMH batteries: Characterization and metal recovery through mechanical processing. *Journal of Power Sources*, 160(2), 1465–1470. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.02.091>

Bhutada, G. (2023). The Six Major Types of Lithium-ion Batteries: A Visual Comparison. <https://elements.visualcapitalist.com/the-six-major-types-of-lithium-ion-batteries/>

- Boddula, R., Inamuddin, Pothu, R., & M. Asiri, A. (Toim.). (2020). Rechargeable batteries: History, progress, and applications (First edition). Wiley-Scrivener.
- Buchmann, I. (2019). BU-301a: Types of Battery Cells. Battery University. <https://batteryuniversity.com/article/bu-301a-types-of-battery-cells>
- Buchmann, I. (2021). BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries. Battery University. <https://batteryuniversity.com/article/bu-107-comparison-table-of-secondary-batteries>
- Buchmann, I. (2021b). BU-807: How to Restore Nickel-based Batteries. Battery University. <https://batteryuniversity.com/article/bu-807-how-to-restore-nickel-based-batteries>
- Buchmann, I. (2022). BU-410: Charging at High and Low Temperatures. Battery University. Saatavissa (viitattu 1.3.2024): <https://batteryuniversity.com/article/bu-410-charging-at-high-and-low-temperatures>
- Buchmann, I. (2023). BU-306: What is the Function of the Separator? Battery University. <https://batteryuniversity.com/article/bu-306-what-is-the-function-of-the-separator>
- Castrejon Suarez del Real, I. (2024). Battery Systems Design: Principles of Battery Operation. Course material. University of Oulu.
- Castrejon Suarez del Real, I. (2024b). Battery Systems Design: Understanding Battery Specifications. Course material. University of Oulu.
- Castrejon Suarez del Real, I. (2024c). Battery Systems Design: Analysing Secondary Batteries. Course material. University of Oulu.
- Castrejon Suarez del Real, I. (2024d). Battery Systems Design: Battery Charging Technology. Course material. University of Oulu.
- Castrejon Suarez del Real, I. (2024e). Battery Systems Design: Battery Management. Course material. University of Oulu.
- Castrejon Suarez del Real, I. (2024f). Battery Systems Design: Electronics of a Battery System. Course material. University of Oulu.
- Crownhart, C. (2023). What's next for batteries. MIT Technology Review. <https://www.technologyreview.com/2023/01/04/1066141/whats-next-for-batteries/>
- Dell, R., & Rand, D. A. J. (with Royal Society of Chemistry (Great Britain)). (2001). Understanding batteries. Royal Society of Chemistry.
- Dynaset Oy. (2024). Verkkosivut. Saatavissa (viitattu 6.7.2024) <https://dynaset.com/fi/>
- Eriksson, L. (2024). Tekninen johtaja, Adigo Drives AB, Ylöjärvi. Haastattelu 2.10.2024.

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 2023/1542. (2024). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj?locale=fi>

Haikala, I., & Mikkonen, T. (2011). *Ohjelmistotuotannon käytännöt* (12. painos.). Alma Insights.

Hall, D., & Lutsey, N. (2018). Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions. icct. [https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/EV-life-cycle-GHG\\_ICCT-Briefing\\_09022018\\_vF.pdf](https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/EV-life-cycle-GHG_ICCT-Briefing_09022018_vF.pdf)

Haynes, W. M., Lide, D. R., & CRC Press (Toim.). (2010). *CRC handbook of chemistry and physics: A ready-reference book of chemical and physical data* (91. ed., 2010–2011). CRC Press.

Hämäläinen, T. (2024). Vanhempi sähkösuunnittelija, tiiminvetäjä, Dynaset Oy, Ylöjärvi. Haastattelu 14.3.2024.

Hänninen, H., Karppinen, M., Leskelä, M. A., & Pohjakallio, M. (2018). *Tekniikan kemia*. Edita. IEC Electropedia. (2004). Primary and secondary cells and batteries (482-02-27). IEC.

Inductiveload. (2016). Wikipedia Commons. AA Alkaline battery energy usage—Discharge current 100mA [Graphic].

Jalovaara, T. (2023). Nio esitteli viimein odotetun 150 kWh:n kiinteän elektrolyytin akkunsa – tämä siitä tiedetään. *Tekniikan Mailma*. <https://tekniikanmaailma.fi/nio-esitteli-viimein-odotetun-150-kwhn-kiinteän-elektrolyytin-akkunsa-tama-siita-tiedetaan/>

Jarid, S., Das, M., & Department of Electrical and Computer Engineering, Oakland University, Rochester, MI 48309, USA. (2021). An Electro-Thermal Model based fast optimal charging strategy for Li-ion batteries. *AIMS Energy*, 9(5), 915–933. <https://doi.org/10.3934/energy.2021043>

Jeevarajan, J. (2021). Manufacturing of high-quality Li-ion cells and batteries. <https://indiaesa.info/resources/storage-101/3900-manufacturing-of-high-quality-li-ion-cells-and-batteries>

Karden, E., Ploumen, S., Fricke, B., Miller, T., & Snyder, K. (2007). Energy storage devices for future hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 168(1), 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.10.090>

Khan, N., Ooi, C. A., Alturki, A., Amir, M., Shreasth, & Alharbi, T. (2024). A critical review of battery cell balancing techniques, optimal design, converter topologies, and performance

evaluation for optimizing storage system in electric vehicles. *Energy Reports*, 11, 4999–5032. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.04.041>

Korthauer, R. (2017). *Lithium-ion batteries: Basics and applications* (1. painos). Springer Berlin Heidelberg.

Lamiel, C., Hussain, I., Ma, X., & Zhang, K. (2022). Properties, functions, and challenges: Current collectors. *Materials Today Chemistry*, 26, 101152. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2022.101152>

Linden, D., & Reddy, T. B. (2011). *Linden's handbook of batteries* (4. painos). McGraw-Hill.

Linja-Aho, V. (2022). *Litiumioniakkutekniikka*. Suomen Autoteknillinen Liitto ry.

Martin, M. (2023). EU:n uusi akku- ja paristoasetus: Miten se vaikuttaa alan toimijoihin? Linnunmaa Lex Oy. <https://www.linnunmaalex.fi/2023/10/26/eun-uusi-akku-ja-paristoasetus-miten-se-vaikuttaa-alan-toimijoihin/>

Miao, Y., Hynan, P., Von Jouanne, A., & Yokochi, A. (2019). Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*, 12(6), 1074. <https://doi.org/10.3390/en12061074>

Motiva. (2023). *Selvitysraportti: Sähköistyminen, hukkalämmöt ja lämpöpumput teollisuudessa*. Motiva Oy. [https://www.motiva.fi/files/19644/Suomen\\_teollisuuden\\_sahkoistyminen\\_ja\\_sen\\_vaikutus\\_energiatehokkuuteen\\_ja\\_hukkalampojen\\_hyodyntamiseen\\_raportti\\_2021.pdf](https://www.motiva.fi/files/19644/Suomen_teollisuuden_sahkoistyminen_ja_sen_vaikutus_energiatehokkuuteen_ja_hukkalampojen_hyodyntamiseen_raportti_2021.pdf)

Motiva. (2024). *Akut*. Motiva Oy. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikuminen/valitse\\_auto\\_viisaasti/ajoneuvotekniikka/akut](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikuminen/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/akut)

Nemeth, T., Schröer, P., Kuipers, M., & Sauer, D. U. (2020). Lithium titanate oxide battery cells for high-power automotive applications – Electro-thermal properties, aging behavior and cost considerations. *Journal of Energy Storage*, 31, 101656. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101656>

Omar, N., Bossche, P., Coosemans, T., & Mierlo, J. (2013). Peukert Revisited—Critical Appraisal and Need for Modification for Lithium-Ion Batteries. *Energies*, 6(11), 5625–5641. <https://doi.org/10.3390/en6115625>

Ovejas, V. J., & Cuadras, A. (2019). State of charge dependency of the overvoltage generated in commercial Li-ion cells. *Journal of Power Sources*, 418, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.02.046>

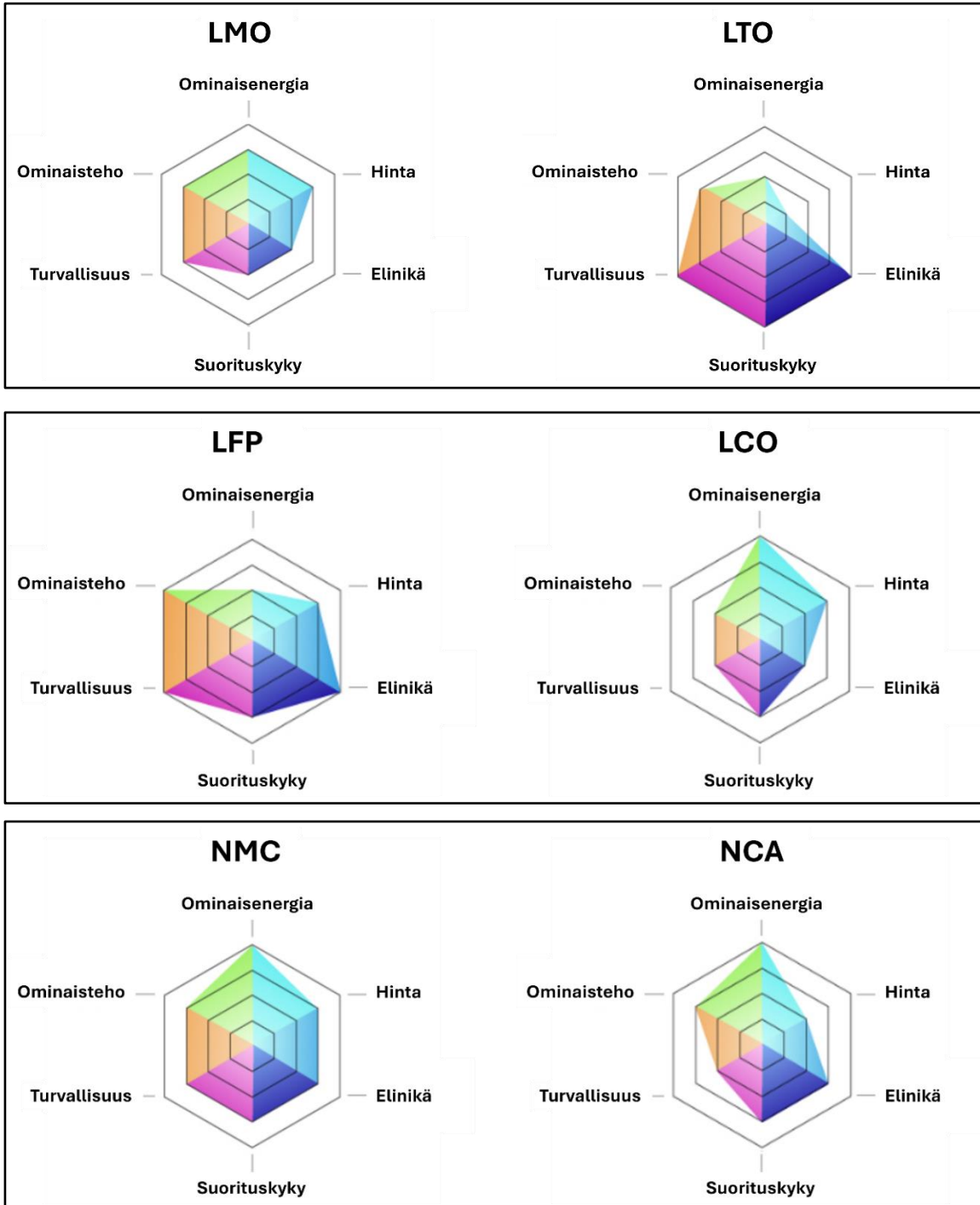
- Rantakokko, V. (2024). Myymäläpäällikkö, Suomen Akut Oy, Ylöjärvi. Sähköpostikeskustelu 2.9.2024.
- Rosen, M. A., & Farsi, A. (2023). Battery technology: From fundamentals to thermal behavior and management. Academic Press.
- Saw, L. H., Tay, A. A. O., & Zhang, L. W. (2015). Thermal management of lithium-ion battery pack with liquid cooling. 2015 31st Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM), 298–302. <https://doi.org/10.1109/SEMI-THERM.2015.7100176>
- Schweidler, S., Bianchini, M., Hartmann, P., Brezesinski, T., & Janek, J. (2020). The Sound of Batteries: An Operando Acoustic Emission Study of the LiNiO<sub>2</sub> Cathode in Li-Ion Cells. *Batteries & Supercaps*, 3(10), 1021–1027. <https://doi.org/10.1002/batt.202000099>
- Suomen akut. (2024a). Power Plus Agm-akku 12V 12 Ah: Datasivut. [https://www.suomenakut.fi/storage/product\\_files/2/2122-GB12-12\\_64b89c2d8ecfcca63583d73e0c7fd594.pdf](https://www.suomenakut.fi/storage/product_files/2/2122-GB12-12_64b89c2d8ecfcca63583d73e0c7fd594.pdf)
- Suomen akut. (2024b). Tab HD12-100 Premium SOC akku 12,8V 100Ah 1280Wh: Datasivut. [https://www.suomenakut.fi/storage/product\\_files/0/3838807049970-TAB\\_2021\\_TDS\\_Premium\\_HD12.8-100\\_7879a5f34765af8c269862abff0e9e78.pdf](https://www.suomenakut.fi/storage/product_files/0/3838807049970-TAB_2021_TDS_Premium_HD12.8-100_7879a5f34765af8c269862abff0e9e78.pdf)
- Tan, X., Vezzini, A., Fan, Y., Khare, N., Xu, Y., & Wei, L. (Toim.). (2022). Battery Management System and its Applications (1. p.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119154013>
- Tsai, C.-T., Kuo, Y.-C., Kuo, Y.-P., & Hsieh, C.-T. (2015). A Reflex Charger with ZVS and Non-Dissipative Cells for Photovoltaic Energy Conversion. *Energies*, 8(2), 1373–1389. <https://doi.org/10.3390/en8021373>
- Ufine. (2024). Cylindrical VS Prismatic VS Pouch Cells: Which is Better?
- Vänskä, S. (2020). Akkuteknologian innovaatiot ja yhteiskunta. Vaasan yliopisto. [https://osuva.uwasa.fi/bitstream/handle/10024/11625/UVA\\_2020\\_V%C3%A4nsk%C3%A4\\_Samuli.pdf?sequence=2](https://osuva.uwasa.fi/bitstream/handle/10024/11625/UVA_2020_V%C3%A4nsk%C3%A4_Samuli.pdf?sequence=2)
- Wang, J., Guo, X., Luo, Z., Yang, H., Chen, M., & Wang, K. (2023). A safety design strategy for practical lithium-ion pouch cells. *Electrochimica Acta*, 465, 142992. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142992>
- Wang, P., & Zhu, C. (2020). Summary of Lead-acid Battery Management System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 440(2), 022014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/440/2/022014>

- Warner, J. (2015). *The handbook of lithium-ion battery pack design: Chemistry, components, types and terminology*. Elsevier.
- Watanabe, N., Arakawa, T., Sasaki, Y., Yamashita, T., & Koiwa, I. (2012). Influence of the Memory Effect on X-ray Photoelectron Spectroscopy and Raman Scattering in Positive Electrode of Ni-MH Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 159(12), A1949–A1953. <https://doi.org/10.1149/2.040212jes>
- Weimar, N. (2019). *Energy Density and Specific Energy of Battery*. Sinovoltaics.
- Xiong, R., Pan, Y., Shen, W., Li, H., & Sun, F. (2020). Lithium-ion battery aging mechanisms and diagnosis method for automotive applications: Recent advances and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110048. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110048>
- Yleiselektroniikka. (2024). AGM-Akku vai geeliakku—Mitä eroa on erilaisilla lyijyakuilla? <https://www.yeint.fi/uutiset/akkujen-erot?srsltid=AfmBOoqaAz7eIOJg3HNu6kbAXrO17MWrp-BXFfzLiPJ8emA1urIZUaMC>
- Zhan, F., Jiang, L. J., Wu, B. R., Xia, Z. H., Wei, X. Y., & Qin, G. R. (1999). Characteristics of Ni/MH power batteries and its application to electric vehicles. *Journal of Alloys and Compounds*, 293–295, 804–808. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(99\)00361-8](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(99)00361-8)
- Zhao, C., Zhang, B., Zheng, Y., Huang, S., Yan, T., & Liu, X. (2020). Hybrid Battery Thermal Management System in Electrical Vehicles: A Review. *Energies*, 13(23), 6257. <https://doi.org/10.3390/en13236257>
- Zia, M. F., Elbouchikhi, E., & Benbouzid, M. (2019). Optimal operational planning of scalable DC microgrid with demand response, islanding, and battery degradation cost considerations. *Applied Energy*, 237, 695–707. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.040>
- Zoski, C. G. (Toim.). (2007). *Handbook of electrochemistry* (1st ed). Elsevier.

## LIITE A: LITIUMIONIAKKUJEN VERTAILU

Tyypillisimpien litiumioniakkujen graafinen vertailu. Ominaisuus on sitä parempi, mitä lähemmäs värillinen muoto ulottuu kohti kyseistä tekstiä. (Huom. hinta on alhaisempi, mitä lähempänä väri on tekstiä. Muut ominaisuudet ovat päinvastaisesti suuremmat)

- Suorituskyvyllä kuvataan tässä tapauksessa akun toimintaa äärimmäisissä lämpötilaolosuhteissa



(Mukailtu lähteestä Bhutada, 2023)

## LIITE B: AKKUTYYPPIEN VERTAILU

Ominaisuus	Muut akut			Litiumioniakut				
	Lyijy	NiCd	NiMH	LCO	LMO	LFP	LTO	
Ominaisenergia (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–250	100–150	90–120	50–100	
Energiätiheys (Wh/l)	50–90	50–150	140–300	500–600	400–500	300	150–200	
Syklikesto	200–300	1 000	300–500	500–1 000	500–1 000	1 000–2 000	> 10 000	
Latausaika (h)	8–16	1–2	2–4	2–4	1–2	1–2	<< 1	
Nimellisjännite (V)	2	1,2	1,2	3,6	3,7	3,3	1,9–2,5	
Sisäinen resistanssi	erittäin pieni	erittäin pieni	pieni	keskisuuri	pieni	erittäin pieni		
Yliatauksen sieto	hyvä	keskisuuri	huonohko		huono			
Itsepurkautuminen (%/kk)	5	20	30		< 5			
Hinta	matala		keskisuuri		keskisuuri ... korkea			
Latauksen katkaisujännite (V)	2,4			4,2	4,2	3,6	2,8	
Purkamisen katkaisujännite (V)	1,75	1,0	1,0		2,5–3,0	2,5		
Suurin purkuvirta	5C	20C	5C	2C	> 30C	> 30C	>> 30C	
Latauslämpötila (°C)	–20 ... 50		0 ... 45		0 ... 45		–30 ... 60	
Purkulämpötila (°C)	–20 ... 50		–20 ... 65					
Turvallisuus	Termisesti vakaa	Termisesti vakaa, sulakesuojaus riittää						
Käytössä kaupallisesti	1800	1950	1990	1991	1996	1999	2008	
Coulombinen hyötysuhde (%)	90		70–90		Lähes 100			
Huollon tarve	Nesteytys <sup>1)</sup>	Purettava tyhjäksi ajoittain <sup>2)</sup>			Täysin huoltovapaa			

(Mukailtu lähteistä Buchmann, 2021; Linja-Aho, 2022, s. 22; Nemeth ym., 2020)